

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Приладобудівний факультет
Кафедра приладобудування

«На правах рукопису»
УДК _____

«До захисту допущено»
В.о. завідувача кафедри

_____ **Юрій КИРИЧУК**
(підпис)

“ ____ ” _____ 2020 р.

Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра
за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно - інтегровані
технології проектування приладів»
зі спеціальності
152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка

на тему: **Дослідження впливу конфігурації гідравлічного каналу на метрологічні характеристики витратоміра**

Виконав: студент 2 курсу, групи ПІ-91мп
(шифр групи)

_____ **Фотул Едуард Петрович** _____
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Науковий керівник доцент, к.т.н., доцент Анна ПИСАРЕЦЬ _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ) (підпис)

Консультант Розробка СТАРТАП-проекту доцент, д.е.н., Катерина БОЯРИНОВА _____
(назва розділу) (посада, вчене звання, Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ) (підпис)

Рецензент _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ) (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2020 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Приладобудівний факультет
Кафедра приладобудування

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка

Освітньо-професійна програма Інформаційно-вимірювальні системи та технології в приладобудуванні

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Юрій КИРИЧУК

«__» _____ 2020 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту

Фотулу Едуарду Петровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації **Дослідження впливу конфігурації гідравлічного каналу на метрологічні характеристики витратоміра**

науковий керівник дисертації **Писарець Анна Валеріївна, к.т.н., доцент**

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від « 05 » листопада 2020р. № 3228

2. Строк подання студентом дисертації **06 грудня 2020 р.**

3. Перелік завдань, які потрібно розробити: **Вступ. Огляд літературних джерел за темою, вибір і обґрунтування напрямів та методів дослідження. Розробка математичної моделі витратоміра. Визначення метрологічних характеристик. Моделювання роботи витратоміра. Аналіз і узагальнення результатів досліджень.**

4. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: **Схеми 1 арк. ф. А1. Витратомір. Складальний кресленник, 1 арк. ф. А1. Робочі креслення деталей, 1 арк. ф. А1. Графічні матеріали, 2 арк. ф. А1. Презентаційний плакат 1 арк. ф. А1.**

5. Орієнтовний перелік публікацій **1 доповідь на науково-технічній конференції**

6. Консультанти розділів дисертації*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розробка СТАРТАП-проекту	Бояринова К. О., д.е.н., доцент		

7. Дата видачі завдання 26 жовтня 2020 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Огляд літератури за темою	26.10.20 – 10.11.20	
2	Розробка математичної моделі витратоміра	08.11.20 – 16.11.20	
3	Визначення метрологічних характеристик витратоміра	14.11.20 – 20.11.20	
4	Моделювання роботи витратоміра	15.11.20 – 30.11.20	
5	Аналіз отриманих результатів	27.11.20 – 06.12.20	
6	Оформлення МД та її графічної частини	20.11.20 – 05.12.20	
7	Передача МД на перевірку науковому керівнику	06.12.20	
8	Передача матеріалів МД на перевірку виявлення збігів/схожості текстів	09.12.20	
9	Представити МД на рецензію	10.12.20	
10	Представити МД на затвердження зав. кафедри	11.12.20	
11	Передача електронної версії МД до бібліотеки	15.12.20	
12	Представити МД до екзаменаційної комісії НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»	16.12.20	

Студент

(підпис)

Едуард ФОТУЛ

(Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Науковий керівник дисертації

(підпис)

Анна ПИСАРЕЦЬ

(Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

* Консультантом не може бути зазначено наукового керівника

ВІДОМІСТЬ МАГІСТЕРСЬКОЇ ДИСЕРТАЦІЇ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4		Завдання на магістерську дисертацію	2	
2	A4	МД.ПЗ	Пояснювальна записка	81	
3	A1	МД.ГД.01	Матеріали аналітичного огляду	1	
4	A1 (A2)	МД. ГД.02 (01...04)	Схеми	1	
5	A1 (A2)	МД.ГД.03.(01..04)	Складальні креслення	1	
6	A1	МД.ГД.04.(01..04)	Графіки	2	
7	A1	МД.ГД.05	Презентаційний аркуш	1	
Загальна кількість графічних документів - 6 арк.ф. А1					

				МД.ВМД		
	ПІБ	Підп.	Дата			
Розробн.				Відомість магістерської дисертації	Лист	Листів
Керівн.					1	1
Конс.					КПІ імені Ігоря Сікорського каф. ПБ гр. ПІ – 91мп	
Н/контр.						
Зав.каф.						

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертаційна робота складається із вступу, п'ятьох розділів, загального висновку, списку використаної літератури. Дисертація містить 70 сторінок основного тексту, 29 ілюстрацій, 23 таблиці і 15 посилань. Загальний обсяг роботи – 81 сторінка.

Мета і задачі роботи. Метою роботи є оцінка впливу конфігурації гідравлічного каналу на метрологічні характеристики витратоміра.

Досягнення цієї мети передбачає розв'язання наступних *задач*:

- узагальнення і аналіз сучасного стану ультразвукових методів вимірювання витрати;
- розробку математичної моделі втрат тиску у перетворювачі витрати;
- проведення математичного моделювання роботи витратоміра для різних конфігурацій гідравлічного каналу;
- відтворення структури каналу за допомогою CFD-технологій;
- оцінку втрат тиску у гідравлічному каналі витратоміра.

Об'єктом дослідження є процес визначення метрологічних характеристик витратоміра.

Предметом дослідження є одноканальний час-імпульсний ультразвуковий витратомір, в якому приймачі-випромінювачі розташовано вздовж вісі потоку.

Методи дослідження: методи, що покладені в основу роботи, базуються на основних законах гідродинаміки (Бернуллі, рівняння нерозривності) для оцінки втрат тиску у гідравлічному каналі витратоміра; методах обчислювальної гідродинаміки (CFD) з використанням програмного комплексу SOLIDWORKS Flow Simulation для підтвердження отриманих результатів.

Наукова новизна отриманих результатів:

- створено математичну модель втрати тиску витратоміра;
- представлено результати досліджень перепаду тиску при різних конфігураціях гідравлічного каналу.

Практичне значення отриманих результатів:

- відпрацьовано методику підвищення точності вимірювання зміною конфігурації гідравлічного каналу.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на науково-практичній конференції «Ефективність інженерних рішень у приладобудуванні» (м. Київ, 2020 р.).

Публікації. Результати роботи опубліковано у матеріалах 1 конференції.

Ключові слова: ультразвук, витратомір, ультразвуковий витратомір, метрологічні характеристики, гідравлічний канал, сенсор, конфузор, дифузор, сопло Вітошинського.

ABSTRACT

The master's dissertation consists of an introduction, five chapters, a general conclusion, a list of references. The dissertation contains 70 pages of the main text, 29 illustrations, 23 tables and 15 references. The total volume of work is 81 pages.

Purpose and objectives of the work. The aim of the work is to assess the influence of the configuration of the hydraulic channel on the metrological characteristics of the flow meter.

Achieving this goal involves solving the following tasks:

- generalization and analysis of the current state of ultrasonic methods of flow measurement;
- development of a mathematical model of pressure losses in the flow transducer;
- carrying out mathematical modeling of the flowmeter operation for different configurations of the hydraulic channel;
- reproduction of the channel structure using CFD-technologies;
- assessment of pressure losses in the hydraulic channel of the flow meter.

The object of research is the process of determining the metrological characteristics of the flow meter.

The subject of the study is a single-channel time-pulse ultrasonic flow meter, in which the receivers-emitters are located along the axis of the flow.

Research methods: the methods underlying the work are based on the basic laws of hydrodynamics (Bernoulli, continuity equation) to estimate the pressure loss in the hydraulic channel of the flow meter; methods of computational hydrodynamics (CFD) using the software package SOLIDWORKS Flow Simulation to confirm the results.

Scientific novelty of the obtained results:

- a mathematical model of flow meter pressure loss is created;
- The results of studies of the pressure drop at different configurations of the hydraulic channel are presented.

The practical significance of the results:

- the technique of increase of accuracy of measurement by change of a configuration of the hydraulic channel is worked out.

Approbation of dissertation results. The main provisions and results of the dissertation were reported and discussed at the scientific-practical conference "Efficiency of engineering solutions in instrument making" (Kyiv, 2020).

Publications. The results of the work were published in the materials of the 1st conference.

Key words: ultrasound, flowmeter, ultrasonic flowmeter, metrological characteristics, hydraulic channel, sensor, confuser, diffuser, Vitoshinsky nozzle.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	6
ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ЗА ТЕМОЮ, ВИБІР І ОБҐРУНТУВАННЯ НАПРЯМІВ ТА МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ	9
1.1 Класифікація ультразвукових витратомірів	9
1.2 Конструкція ультразвукових сенсорів	14
1.3 Розробка схеми вимірювання	17
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ	20
2.1 Математична модель статичної характеристики	20
2.2 Математичний опис перепаду тиску	21
РОЗДІЛ 3 МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ВИТРАТОМІРА	30
3.1 Геометрична модель гідравлічного каналу витратоміра.	30
3.2 Імітаційне моделювання витратоміра.	33
РОЗДІЛ 4 РОЗРАХУНОК МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИТРАТОМІРА.....	35
4.1 Статична характеристика	35
4.2 Перепад тиску	36
РОЗДІЛ 5. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП – ПРОЕКТУ «ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОНФІГУРАЦІЇ ГІДРАВЛІЧНОГО КАНАЛУ НА МЕТРОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВИТРАТОМІРА»	43
ВИСНОВКИ.....	64
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	65
ДОДАТКИ	

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ПС – плинне середовище

УЗ – ультразвук

УЗВ – ультразвуковий витратомір

УЗП – ультразвукові вимірювальні перетворювачі

ПЕП – п'єзоелектричний перетворювач

ПЗ – програмне забезпечення

ВСТУП

Як відомо, всі речовини можуть знаходитися в рідкому, твердому та газоподібному станах залежно від температури і фізико-хімічних властивостей.

Завдяки сучасним цифровим технологіям більшість витратомірів, що містять обчислювальний блок, є і лічильниками, тобто дозволяють отримати інформацію як про миттєву витрату, так і про кількість речовини за певний період часу.

Серед широкого спектру методів вимірювання витрат рідин усе більшого поширення для вузлів комерційного обліку набувають акустичні методи.

Акустичними називаються витратоміри, що базуються на вимірюванні витрати залежної від того чи іншого ефекту, що виникає при проходженні акустичних коливань через потік плинного середовища. Майже всі застосовувані на практиці акустичні витратоміри працюють в ультразвуковому діапазоні частот і тому називаються ультразвуковими [1-5].

Ультразвукові витратоміри зазвичай використовуються для вимірювання об'ємної витрати, оскільки ефекти, що виникають при проходженні акустичних коливань через потік рідини або газу, пов'язані зі швидкістю останнього. Але додаванням акустичного перетворювача, який реагує на густину вимірюваної речовини, можна здійснити і вимірювання масової витрати. Похибка ультразвукових витратомірів знаходиться в межах від 0,1 до 2,5 %, але в середньому може бути оцінена значеннями 0,5-1 % [1-5].

Значно частіше такі витратоміри застосовують для вимірювання витрати рідини, а не газу, внаслідок малого акустичного опору газу і труднощів отримання в ньому інтенсивних звукових коливань. Ультразвукові витратоміри застосовуються для трубопроводів будь-якого діаметру, починаючи від 10 мм і більше [1-5].

Існуючі витратоміри дуже різноманітні як за принципом дії первинних перетворювачів, так і за схемами застосування. При вимірюванні витрати в рідинах без домішків зазвичай застосовують високі частоти (0,1-10 МГц) акустичних коливань. При вимірюванні же забруднених речовин частоти

коливань доводиться істотно знижувати аж до декількох десятків кілогерц для запобігання розсіюванню і поглинанню акустичних коливань. Необхідно, щоб довжина хвилі була на порядок більше за діаметр твердих частинок або повітряних бульбашок. Низькі частоти застосовують також при вимірюванні витрати газів [5].

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ЗА ТЕМОЮ, ВИБІР І ОБҐРУНТУВАННЯ НАПРЯМІВ ТА МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Класифікація ультразвукових витратомірів

Ультразвуковий метод вимірювання витрати рідини базується на використанні ефекту зсуву акустичних коливань потоком контрольованого середовища. Ступінь зсуву може бути виявлена шляхом вимірювання одного з параметрів, що характеризують ультразвукові коливання – фази, частоти, амплітуди та ін. [6].

Ультразвукові вимірювальні перетворювачі (УЗП) витрати можна класифікувати за такими ознаками (рис. 1.1): спосіб руху УЗ хвиль; спрямованість УЗ променя відносно потоку; кількість каналів вимірювання; вид акустичного шляху; спосіб розміщення п'єзоперетворювача [6].

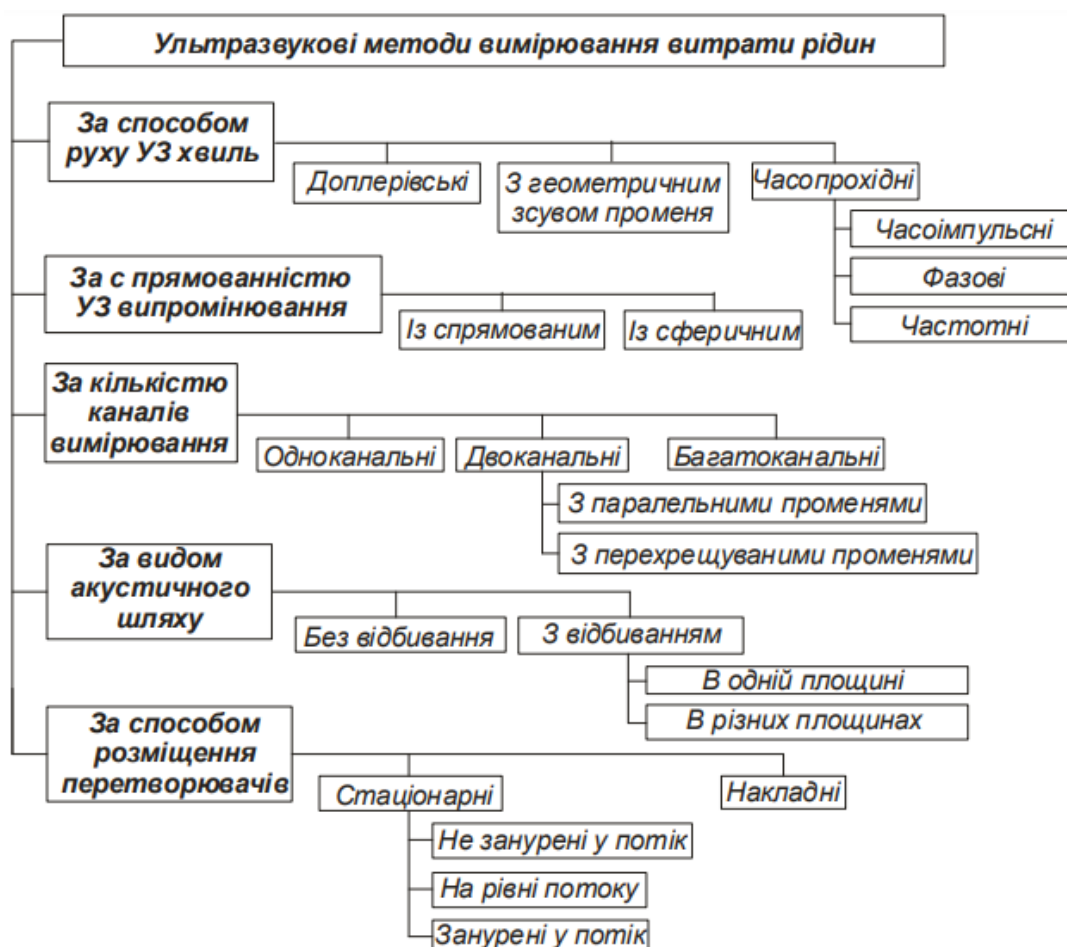


Рис. 1.1. Загальна класифікація ультразвукових методів вимірювання витрати

Залежно від характеру руху УЗ хвиль відомо три методи реєстрації витрати рідин та газів (рис. 1.2) [6].

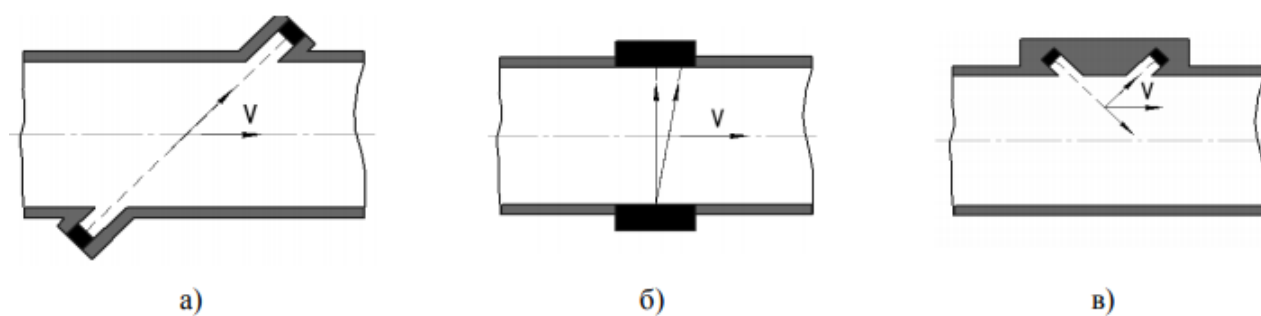


Рис. 1.2 Схеми вимірювання витрати за допомогою УЗ методів: а – часопрхідний; б – геометричного зсуву променю; в – доплерівський

Метод, що базується на різниці швидкості розповсюдження УЗ хвиль, спрямованих за потоком та проти нього (рис. 1.2, а). Зондуючий імпульс в даному випадку випромінюється і приймається по чергово парами п'єзоелектричних перетворювачів [6].

Даний метод реалізується трьома принципами вимірювання: часоімпульсним, фазовим та частотним [6]:

- 1) у часоімпульсних засобах вимірювань в процесі реєстрації пари акустично пов'язаних між собою перетворювачів витратоміра по чергово генерують та приймають визначене число ультразвукових імпульсів. Інтервал часу між посиленням та прийомом ультразвукових сигналів змінюється у двох напрямках. Порівнюючи час проходження сигналу за потоком та проти нього, автоматично визначається швидкість вимірюваного середовища. За отриманим значенням швидкості та номінальним діаметром вимірювальної ділянки [6].
- 2) фазові витратоміри базуються на залежності фазових зсувів УЗ коливань, що виникають на прийомних п'єзoeлементах, від різниці часів проходження цими коливаннями однієї та тієї ж відстані за потоком рухомого середовища та проти нього [6].
- 3) частотні прилади базуються на залежності різниці частот повторення коротких імпульсів або пакетів УЗ коливань від різниці часів

проходження цими коливаннями однієї і тієї ж відстані за потоком вимірюваного середовища та проти нього [6].

Метод, який базується на геометричному зсуві УЗ хвилі (з перпендикулярним розташуванням променя відносно вісі потоку), обумовлений плином вимірюваного потоку (рис. 1.2, б). УЗ хвилі випромінюються у вимірюване середовище по нормалі до напрямку руху потоку. Два приймальних п'єзоелементи розміщуються один біля одного так, що при нерухомому вимірюваному потоці пакети імпульсів, прийнятих кожним п'єзоелементом, однакові [6]. При плинні вимірюваного потоку УЗ хвилі розповсюджуються за напрямком потоку, при цьому інтенсивність УЗ коливань на прийомних п'єзоелементах відрізняється. Отримана різниця сигналів на прийомних п'єзоелементах є мірою витрати [6].

Метод, який використовує ефект Доплера, що базується на зміні частоти хвилі під час її відбивання від рухомого об'єкту. Зміна частоти відбитого сигналу дозволяє визначити швидкість потоку. Вимірювана різниця частот може служити для вимірювання місцевої швидкості потоку [6].

Спрямованість УЗ променя відносно потоку випромінювання описує види зондуючих імпульсів які випромінюються сенсорами всередині гідравлічного каналу УЗВ.

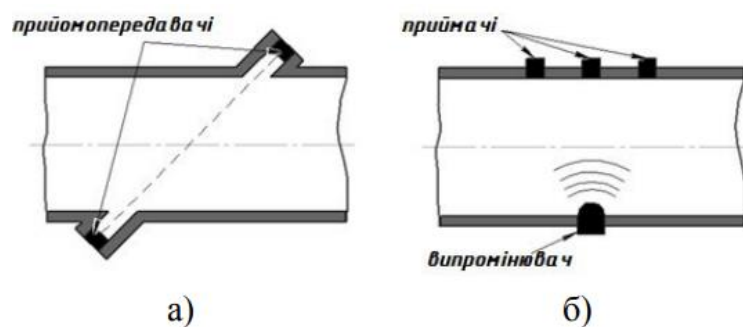


Рис. 1.3. Види зондуючих імпульсів: а – спрямований; б – сферичний

За цим критерієм витратоміри поділяються на дві категорії [6]:

- із спрямованим випромінюванням – пара сенсорів по чергово випромінює вузькоспрямовані імпульси у бік один одного (рис. 1.3, а) [6];
- із багатонапрямним випромінювачем, який випромінює широкопрямований імпульс, адресований відразу декільком

приймачам, розташованим вище та нижче за потоком (рис. 1.3, б) [6].

Класифікація за кількістю каналів вимірювання визначає кількість сенсорів (приймачів та випромінювачів УЗ хвиль) задіяних у роботі ультразвукового витратоміра [6].

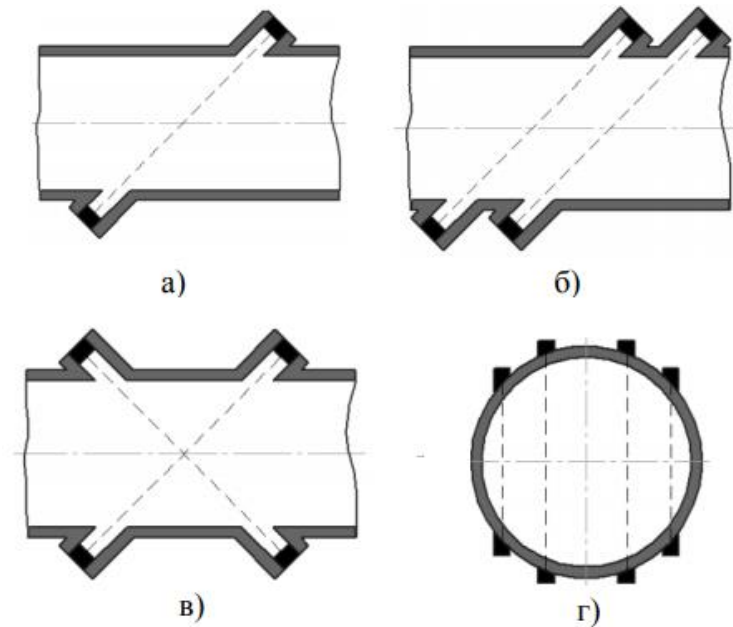


Рис. 1.4. Схеми УЗ перетворювачів витрати: а – одноканальний, б – двоканальний з паралельними променями, в – двоканальний з променями навхрест, г – багатоканальний

За кількістю каналів вимірювання УЗ витратоміри поділяють на:

- одноканальні (однопроменеві) – мають два п'єзоелектричні перетворювачі, кожен з яких по чергово виконує функції випромінювача та приймача (рис. 1.4, а) [6];
- двоканальні (двопроменеві) – містять чотири п'єзоелектричні випромінювачі, що створюють два незалежних акустичних канали (рис. 1.4, б, в), які розташовані або паралельно, або навхрест [6];
- багатоканальні (багатопробієві) – мають більше двох каналів та застосовуються з метою досягнення підвищеної точності (рис. 1.4, г) [6].

Види акустичного шляху, які можуть бути присутні в роботі ультразвукового витратоміра представлені на рис. 5.

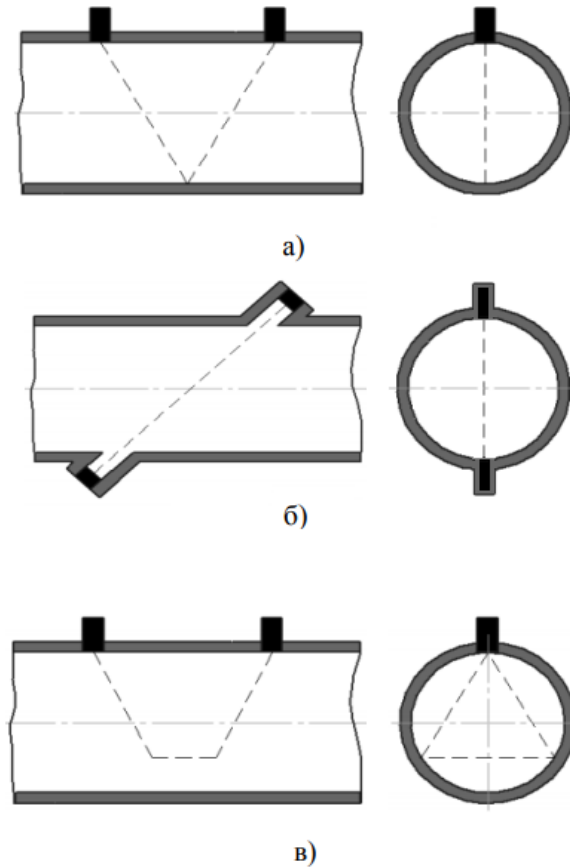


Рис. 1.5. Види акустичного шляху: а – з відбиванням в одній площині, б – без відбивання, в – з відбиванням у різних площинах

За видом акустичного шляху УЗ перетворювачі витрати можна поділити на дві групи [6]:

- з відбиванням – зонduючий імпульс від випромінювача перед тим як досягнути приймача, один або декілька разів відбивається від внутрішньої поверхні вимірювального тракту. Усі відрізки шляху зонduючого імпульсу можуть знаходитись як в одній (рис. 5, а), так і в різних площинах (рис. 1.5, в) [6];
- без відбивання – зонduючий імпульс від випромінювача проходить крізь потік та досягає приймача (рис. 1.5, б) [6].

Ілюстрація способів розміщення п'єзoeлектричних перетворювачів представлена на рис. 6.

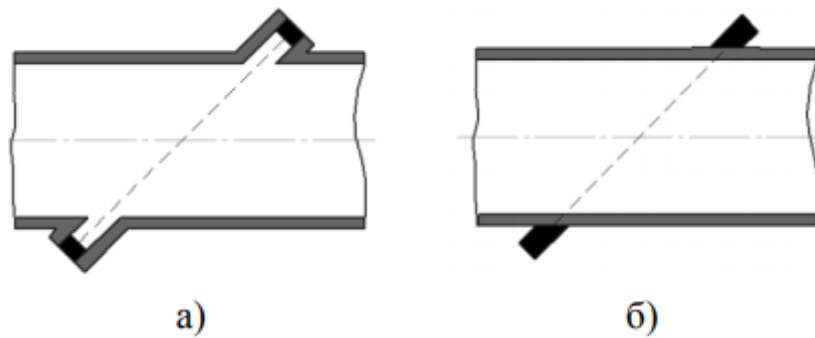


Рис. 1.6. Способи розміщення УЗ перетворювачів: а – із зануренням ПЕП, б – накладні ПЕП.

За способом розміщення п'єзоелектричних перетворювачів (ПЕП) існують УЗ витратоміри:

- із зануреними перетворювачами – ПЕП випромінюють пакети імпульсів безпосередньо у вимірюване середовище (рис. 1.6, а) [6];
- із накладними перетворювачами (витратоміри з заломленням) – ПЕП встановлюється на стінку трубопроводу, зонduючий імпульс проходить крізь стінку трубопроводу та потрапляє до вимірюваного потоку (рис. 1.6, б) [6].

1.2 Конструкція ультразвукових сенсорів

Пристрої, що перетворюють електричний струм в хвилі ультразвуку, називаються ультразвуковими сенсорами. Їх принцип дії аналогічний роботі радара, вони вловлюють ціль по відбитому сигналу. Швидкість звуку - величина постійна. На підставі цього таким датчиком обчислюється відстань до деякого об'єкту, відповідна діапазону часу між виходом сигналу і його поверненням [7].

Принцип роботи ультразвукових сенсорів ґрунтується на взаємодії коливань ультразвуку з вимірюваним середовищем. Ультразвукові коливання - це механічні коливання, які рухаються з частотою вище 20000 Гц, а відповідно більше верхньої межі коливань звуку, яка сприймається людиною [7].

Поширення таких коливань в газоподібних, рідких і твердих середовищах залежить від параметрів самого середовища. Швидкість передачі коливань для газів дорівнює 200-1300 метрів в секунду, для твердих тіл 1500-8000 м / с, для рідких речовин 1100-2000 м / с [7].

Коефіцієнти відбиття хвиль ультразвуку відрізняються на границях різних середовищ, так само як їх здатність поглинання звуку. Тому ультразвукові сенсори використовують для отримання інформації про різні неелектричні параметри за допомогою вимірювання властивостей коливань ультразвуку [7].

Ультразвукові способи вимірювання є електричними, оскільки збудження коливань і їх прийом здійснюється за допомогою струму. Найчастіше в датчиках застосовують п'єзоелементи, перетворювачі магнітострикційного виду. Для збудження коливань ультразвукової частоти застосовується ефект розтягування і стиснення п'єзокристала, званий зворотним п'єзоефектом. Тому п'єзоелемент застосовується в якості як приймача коливань, так випромінювача [7].

Магнітострикційні датчики. Випромінювачі магнітострикційного виду (рис. 1.7) застосовують ефект деформації феромагнітів у магнітному полі. Випромінювач стрижневого виду виконаний у вигляді тонких листів феромагнетика, на якому намотана котушка збудження [7].

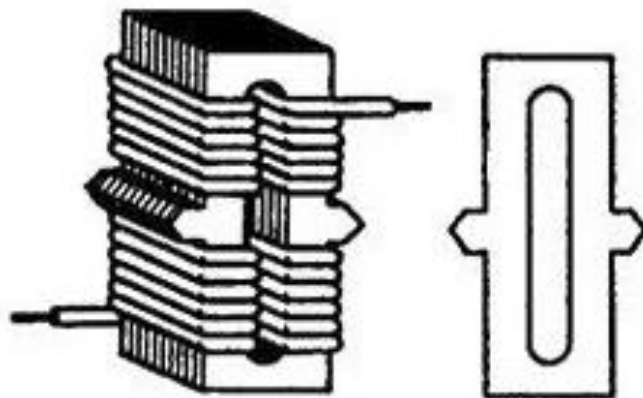


Рис. 1.7 Випромінювачі магнітострикційного виду [7].

У магнітострикційних випромінювачах часто застосовуються сплави нікелю, ферити. При знаходженні феромагнітного стрижня в змінному магнітному полі, він буде розтягуватись і стискатися з частотою поля [7].

Щоб отримати значні механічні деформації застосовують додаткове підмагнічування стрижня. Магнітострикційні випромінювачі діють в умовах резонансу, якщо частота поля збудження збігається з коливаннями стрижня, що визначаються за формулою [7]:

$$f = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{E}{\rho}},$$

де l – довжина стрижня, E – модуль пружності, ρ – густина.

Сенсори на основі п'єзоелемента. У випромінювачі на основі п'єзоелемента (Рис. 1.8) застосовується кварцова пластина, до якої підключено змінну напругу U_x , що утворює електричне поле по осі x [7].

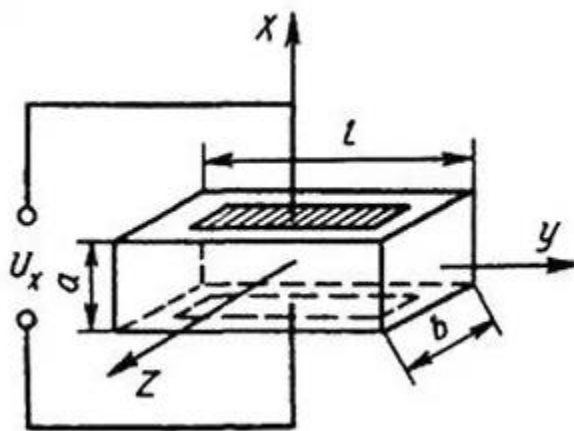


Рис. 1.8 Випромінювач на основі п'єзоелемента.

Зворотний ефект полягає в деформації пластини по осі X . Відносна зміна розміру товщини пластини буде дорівнювати [7]

$$\frac{\Delta a}{a} = \frac{k U_x}{a}.$$

Поперечний ефект полягає в деформації пластини по осі У. Відносна зміна товщини пластини оцінюється так [7]

$$\frac{\Delta l}{l} = \frac{k U_x}{a}.$$

Розміри пластини не впливають на величину поздовжньої деформації. Поперечна деформація збільшується зі зростанням співвідношення l / a . При різниці потенціалів до 2500 вольт є пряма залежність деформації і напруги. При високій напрузі деформація підвищується не так інтенсивно. Амплітуда коливань доходить до максимального значення, коли частота напруги і частота коливань пластини збігаються. Частота поздовжніх коливань обчислюється за вразом [7]

$$f = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{E_x}{\rho}}.$$

Модуль пружності визначається по осі Х. Модуль пружності по осі У впливає на частоту поперечних коливань і визначається за наступною формулою [7]

$$f = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{E_y}{\rho}}.$$

Якщо порівняти два розглянутих типи випромінювачів, то бачимо, що п'єзоелектричні випромінювачі можуть забезпечити більшу частоту коливань ультразвуку [7].

1.3 Розробка схеми вимірювання

Методи вимірювань витрати плинного середовища базуються на перетворенні енергії потоку в інші види енергії, більш зручні для вимірювань, або в електричний сигнал. Тому структуру витратоміра можна подати як сукупність первинного перетворювача (ПП), вимірювального блоку (ВБ) та

відлікового пристрою (ВП) (Рис. 1.9). Функції ВБ і ВП можуть бути об'єднані у структурі обчислювального пристрою (ОП) [5].

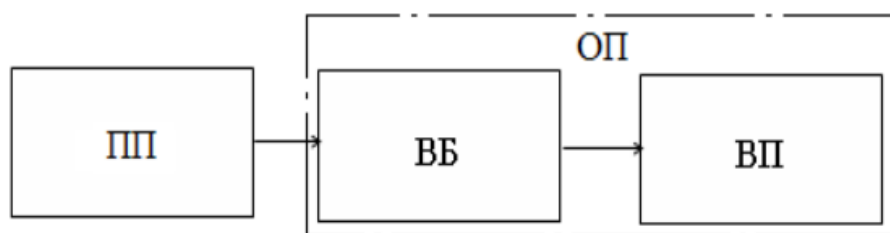


Рис. 1.9. Спрощена структурна схема витратоміра

Принцип вимірювання швидкості потоку рідини пояснюється на рис. 1.10.

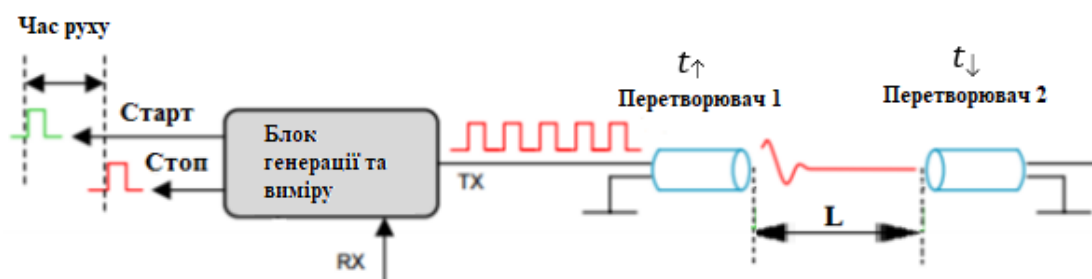


Рис. 1.10. Схема для розрахунку швидкості потоку, де: L – відстань між сенсорами; t_{\uparrow} , t_{\downarrow} – відповідно час проходження ультразвуку за і проти потоку; R_x – зворотній зв'язок; T_x – прямий зв'язок.

Принцип дії ПП витратоміра базується на тому, що час, за який звуковий сигнал проходить визначену відстань в потоці рідини, залежить від швидкості її течії. Отже, вимірюючи час проходження звукового сигналу за потоком і проти нього, і обробивши його визначеним чином, можна отримати інформацію про швидкість, і обробивши сигнал, за визначених умов, можна отримати інформацію про витрату [5].

Звукові коливання високої частоти (20 кГц і більше), створювані електроакустичним вібратором (випромінювачем) В1, проходять крізь середовище, що протікає трубопроводом, та реєструються приймачем П1, що

відстає від випромінювача на відстань L (рис. 1.11) [5].

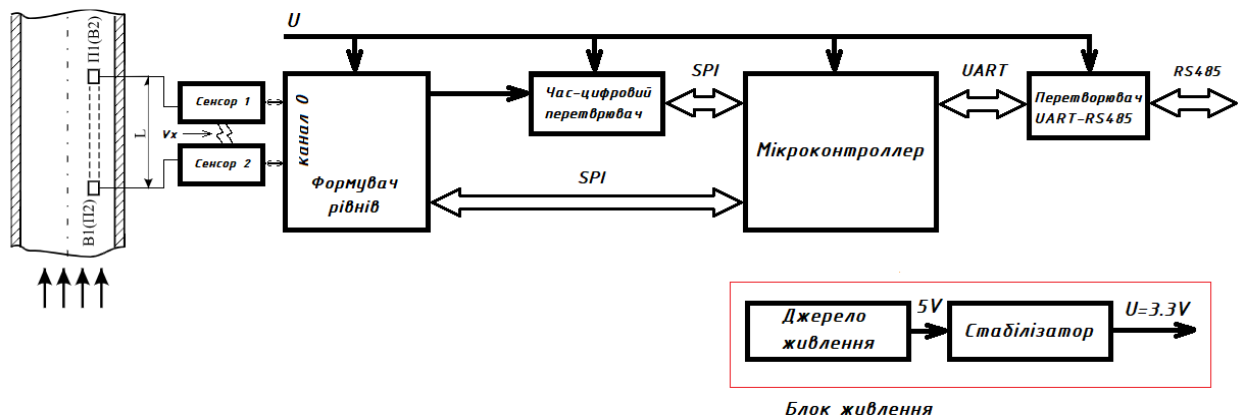


Рис. 1.11. Структурна схема ультразвукового витратоміра

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ

Всі засоби вимірювальної техніки, незалежно від їх конкретного виконання, мають ряд загальних властивостей, необхідних для виконання ними їх функціонального призначення [8].

Технічні характеристики, що описують ці властивості і впливають на результати і на похибки вимірювань, називаються метрологічними характеристиками. Комплекс нормованих метрологічних характеристик встановлюється таким чином, щоб з їх допомогою можна було оцінити похибку вимірювань, що здійснюються за відомих робочих умов експлуатації за допомогою окремих засобів вимірювальної техніки або сукупності засобів вимірювань, наприклад автоматичних вимірювальних систем [8].

2.1 Математична модель статичної характеристики

Якщо v – швидкість потоку вимірюваного середовища, а c – швидкість звуку в цьому середовищі, то тривалість розповсюдження звукової хвилі за напрямом руху потоку від випромінювача до приймача [3, 4, 8]

$$\tau_1 = \frac{L}{c + v}. \quad (2.1)$$

Тривалість розповсюдження звукової хвилі проти потоку від випромінювача до приймача визначається аналогічно [3, 4, 8]

$$\tau_2 = \frac{L}{c - v}. \quad (2.2)$$

На основі (2.1) та (2.2) визначимо $\tau_2 - \tau_1$, що вимірюється електронно-лічильною схемою [3, 4, 8]

$$\Delta\tau = \frac{2Lv}{c^2} \cdot \frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}}. \quad (2.3)$$

Знайдемо залежність між $\Delta\tau$ та витратою Q . Для цього виразимо швидкість потоку вимірюваного середовища через витрату. Оскільки v^2/c^2 набагато менше за одиницю, то отримуємо [3, 4, 8]

$$\Delta\tau = \varphi \frac{2L}{Fc^2} Q, \quad (2.4)$$

де F – площа живого перерізу потоку, φ – коефіцієнт, що враховує розподіл швидкості за перерізом потоку.

2.2 Математичний опис перепаду тиску

Для визначення втрати тиску у первинному перетворювачі витрати необхідно провести гідравлічний розрахунок конструкції (Рис. 2.2).

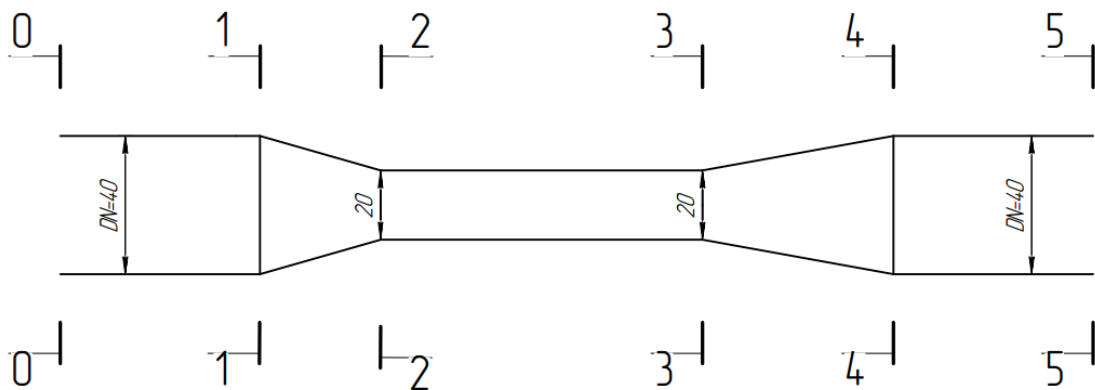


Рис. 2.2. Гідравлічна схема конструкції

Ділянка між перерізами 0-0 і 1-1 є прямою, отже втрата тиску на ній обумовлена тільки тертям за довжиною і визначається залежністю Дарсі-Вейсбаха для круглих трубопроводів [9].

(2.8)

де λ_t – лінійний коефіцієнт опору тертя, залежний від режиму руху вимірюваного потоку; R – гідравлічний радіус; v – середня швидкість потоку у перерізі; l – довжина ділянки [9, 10].

Для розвинутого турбулентного току λ_t – становить

$$\lambda_t = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}, \quad (2.9)$$

де Re – число Рейнольдса

$$(2.10)$$

де ν – кінематичний коефіцієнт в'язкості; χ – характерний лінійний розмір перерізу.

З урахуванням (2.8) для статичного тиску у перерізі 1-1 можна записати

$$P_1 = P_0 - h_{l_{01}}, \quad (2.11)$$

де індекс 01 – ділянка між перерізом 0-0 і 1-1 [11, 12]

Ділянка між перерізами 1-1 і 2-2 являє собою конфузор. Відповідно до рівняння Бернуллі статичний тиск у перерізі 2-2 визначається за виразом [9, 10]

$$P_2 = P_1 + \frac{\rho v_{сеп1}^2}{2} \left(1 - \frac{S_{ж1}^2}{S_{ж2}^2} (1 + \xi_{12}) \right), \quad (2.12)$$

Де S – площа i -го живого перерізу; ρ – густина вимірюваного середовища; ξ_{ij} – коефіцієнт гідравлічного опору на ділянці між перерізами i та j який розраховується за формулою [9, 10]

$$(2.13)$$

де коефіцієнт опору тертя; n – степінь розширення потоку.

Для випадку що розглядається n , розраховуються за

$$n = \frac{R_2^2}{R_1^2}; \quad (2.14)$$

$$(2.15)$$

$$\frac{\gamma}{2} = \arctg \left(\frac{R_1 - R_2}{L_{12}} \right), \quad (2.16)$$

де R_i – радіус i -го перерізу.

Відрізок гідравлічного каналу між перерізами 2-2 і 3-3 являє собою пряму ділянку. Тому втрати тиску тут обумовлені тертям за довжиною потоку [9, 10].

$$P_3 = P_2 - h_{l_{23}}, \quad (2.17)$$

де величина $h_{l_{23}}$ – визначається за виразом (2.8)

Ділянка 3-4 є дифузором, тому для статичного тиску у перерізі 4-4 можна записати [9, 10]

$$P_4 = P_3 + \frac{\rho v_{\text{ср}3}^2}{2} \left(1 - \frac{S_{\text{ж}3}^2}{S_{\text{ж}4}^2} (1 + \xi_{34}) \right). \quad (2.18)$$

Коефіцієнт місцевого опору дифузора відповідно до [9, 10] визначається так

$$(2.19)$$

У досліджуваному випадку

$$n = \frac{R_4^2}{R_3^2}; \quad (2.20)$$

$$\gamma = 2 \arctg \left(\frac{R_4 - R_3}{L_{34}} \right); \quad (2.21)$$

$$(2.22)$$

Статичний тиск у перерізі 5-5 визначається за виразом [9, 10]

$$P_5 = P_4 - h_{l_{45}}, \quad (2.23)$$

де величина $h_{l_{45}}$ – визначається за виразом (2.8) з урахуванням особливостей відповідних перерізів.

Втрата тиску у гідравлічному каналі перетворювача витрати визначається різницею тисків у вихідному 5-5 і вхідному 0-0 перерізах за виразом [9, 10]

$$\Delta P = P_5 - P_1. \quad (2.24)$$

2.3 Похибка вимірювань

Причин, що призводять до появи похибок при вимірюваннях, надзвичайно багато. Вони зумовлені: недостатнім знанням властивостей досліджуваного об'єкта; недосконалістю методів та засобів вимірювань, властивістю вимірювального об'єкта; динамічними умовами вимірювань; похибкою шкали; округленням результатів вимірювання; впливом навколишнього середовища тощо. Звичайно, одним з основних завдань при проведенні будь-якого вимірювання є виявлення та усунення причин та завад, що призводять до появи похибок. Аналізуючи причини виникнення похибок, необхідно виділяти ті, які найбільш істотно впливають на результат вимірювань [13, 14].

Обов'язковими компонентами будь-якого вимірювання є метод вимірювання, засоби вимірювань, участь людини. Неідеальність кожного компоненту вимірювання вносить свій вклад у похибку вимірювання. Тому в загальному вигляді можна записати [13, 14]

$$\xi = \xi_M + \xi_E + \xi_{\text{л}},$$

де ξ_M – методична похибка, ξ_E – інструментальна похибка, $\xi_{\text{л}}$ – особиста похибка.

Кожна із складових похибки вимірювання, в свою чергу, може бути викликана низькою причин [13, 14].

Методичні похибки можуть виникати внаслідок недостатньої розробленості теорії тих явищ, на яких базуються вимірювання, та неточності тих співвідношень, що використовуються для визначення оцінки вимірюваної величини [13, 14].

Інструментальні похибки вимірювання – складова похибок вимірювання, зумовлена недосконалістю засобів вимірювальної техніки. Ця похибка також може бути обумовлена конструктивними та технологічними недоліками. Наприклад, через неточність виготовлення та нестабільність елементів засобів вимірювальної техніки, неправильне градування шкали приладу тощо [13, 14].

Суб'єктивні (особисті) похибки – як правило, є наслідком особистих властивостей спостерігача (експериментатора), які зумовлені особливостями його організму (недосконалість зору, втомленість тощо) [13, 14].

Вдосконалення засобів вимірювань призводить до того, що при застосуванні сучасних засобів вимірювань особисті похибки мають незначні величини (при застосуванні цифрових приладів вони взагалі зникають) [13, 14].

Наведена класифікація похибок вимірювань – класифікація за причинами з'явлення похибок [13, 14].

За умовами проведення вимірювань розрізняють *основну* та *додаткові похибки* [13, 14].

Основна похибка – похибка, яка виникає за нормальних умов застосування засобів вимірювальної техніки. Ця похибка нормується і вказується у відповідних документах (технічному паспорті, формулярі) [8, 13, 14].

Додаткова похибка – обумовлюється відхиленням однієї чи декількох впливових величин (температури, тиску, вологості тощо) від нормального значення. Значення додаткової похибки, як і основної, нормується і вказується у відповідних технічних документах [8, 13, 14].

Диференціальний метод розрахунку похибки. Точність засобу вимірювань завжди визначають за кожним вихідним інформативним параметром. Інформативний параметр y представляють як функцію декількох вхідних параметрів x_1, x_2, \dots, x_n . Під вхідними параметрами розуміють не тільки параметри вимірюваної фізичної величини, але і параметри та елементи вимірювального ланцюга засобу вимірювань, а також зовнішні фактори. Тому вихідний параметр y запишемо в загальному вигляді як [8, 13, 14]:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n),$$

де n – кількість вхідних параметрів, що впливають на значення вихідного параметра.

Для вибраних розрахункових значень вхідних параметрів вихідний параметр буде мати потрібне значення [8, 11, 12]:

$$y_0 = f(x_{01}, x_{02}, \dots, x_{0n}).$$

В дійсності значення вхідних параметрів можуть відрізнятися від взятого при розрахунку. Значення вихідного параметра буде відрізнятися від потрібного на величину Δy [13, 14]:

$$y = y_0 + \Delta y = f(x_{01} + \Delta x_1; x_{02} + \Delta x_2; \dots; x_{0n} + \Delta x_n).$$

Для знаходження похибки Δy розкладемо функцію f в ряд Тейлора і, переходячи до кінцевих приростів, запишемо [13, 14]:

$$y = y_0 + \frac{\partial f}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} \Delta x_2 + \dots + \frac{\partial f}{\partial x_n} \Delta x_n + \\ + \frac{1}{2} \left[\frac{\partial^2 f}{\partial x_1^2} (\Delta x_1)^2 + \dots + \frac{\partial^2 f}{\partial x_n^2} (\Delta x_n)^2 + 2 \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_2} \Delta x_1 \Delta x_2 + \dots \right] + \dots$$

Оскільки первинні похибки Δx малі порівняно із значенням вхідних параметрів, нехтуючи їх квадратом і добутком, запишемо [8, 13, 14]:

$$y = y_0 + \Delta y \approx y_0 + \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i.$$

Вираз для похибки вихідного параметра отримуємо у вигляді

$$\Delta y = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i,$$

або

$$\Delta y = \sum_{i=1}^n b_i \Delta x_i,$$

де b_i – коефіцієнти впливу похибки i -го вхідного параметра.

Відносна похибка

$$\delta_y = \frac{\Delta y}{y_0} = \left(\sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i \right) / y_0.$$

Якщо $\Delta x \rightarrow 0$, то $\frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i = d_x y$ – диференціал по x , тоді відносну похибку запишемо у вигляді

$$\delta_y = \frac{dy_0}{y_0} = d \ln y_0 = d \ln f(x_{01}, x_{02}, \dots, x_{0n}),$$

або

$$\delta_y = \frac{d \ln y_0}{dx_1} \Delta x_1 + \frac{d \ln y_0}{dx_2} \Delta x_2 + \dots + \frac{d \ln y_0}{dx_n} \Delta x_n = k_1 \Delta x_1 + k_n \Delta x_n,$$

де k – коефіцієнти впливу первинних похибок, що представляють собою похідні по вхідному параметру від логарифма функції вихідного параметра [8, 13, 14].

Якщо при розрахунку похибки коефіцієнт впливу (частинні похідні) взяти за абсолютним значенням $\left| \frac{\partial f}{\partial x} \Delta x \right|$ і $\left| \frac{d \ln y_0}{dx} \Delta x \right|$, то при граничних значеннях первинних похибок отримаємо граничні значення похибок вихідного параметра.

Основні похибки. Джерелами основних похибок є похибки вхідних параметрів, які визначають статичну характеристику засобів вимірювань або перетворюючих елементів. У загальному вигляді статична характеристика має вид

$$y = f(x, a, b, \dots, m),$$

де y – вихідний параметр (сигнал); x – вхідний сигнал; a, b, \dots, m – вхідні параметри, що визначають статичну характеристику [8, 13, 14].

Похибку вихідного параметра представляють у вигляді суми частинних похибок, обумовлених первинними похибками.

Для систематичної складової похибки результуюча похибка засобу вимірювання

$$\Delta y = \Delta y_a + \Delta y_b + \dots + \Delta y_m = \sum_{i=1}^n \Delta y_i,$$

де Δy_i – частинні похибки.

Частинні похибки мають вигляд

$$\Delta y_a = \left(\frac{\partial f}{\partial a} \right) \Delta a; \quad \Delta y_b = \left(\frac{\partial f}{\partial b} \right) \Delta b; \quad \dots; \quad \Delta y_m = \left(\frac{\partial f}{\partial m} \right) \Delta m,$$

де $\Delta a, \Delta b, \dots, \Delta m$ – первинні похибки параметрів.

Випадкову складову похибки вихідного параметра представляють середнім квадратичним відхиленням

$$\sigma(\Delta) = \sqrt{D[\Delta]} = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial a} \right)^2 \sigma^2(\Delta a) + \left(\frac{\partial f}{\partial b} \right)^2 \sigma^2(\Delta b) + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial m} \right)^2 \sigma^2(\Delta m)},$$

де $\sigma^2(\Delta a), \sigma^2(\Delta b), \dots, \sigma^2(\Delta m)$ – дисперсії похибки вхідних параметрів a, b, \dots, m .

Статична характеристика ультразвукового витратоміра має вигляд

$$\Delta \tau = \varphi \frac{2L}{Fc^2} Q,$$

де $\Delta \tau$ – різниця часів проходження ультразвуку за і проти потоку, L – відстань між сенсорами, c – швидкість ультразвуку в середовищі, F – площа живого перерізу потоку, φ – коефіцієнт, що враховує розподіл швидкості за перерізом потоку [8, 13, 14].

Систематична складова похибки різниці часів буде дорівнювати

$$\Delta_{\Delta \tau} = \Delta_{\Delta \tau \varphi} + \Delta_{\Delta \tau L} + \Delta_{\Delta \tau Q} + \Delta_{\Delta \tau F}$$

або

$$\Delta_{\Delta \tau} = \frac{\partial \Delta \tau}{\partial \varphi} \Delta \varphi + \frac{\partial \Delta \tau}{\partial L} \Delta L + \frac{\partial \Delta \tau}{\partial F} \Delta F + \frac{\partial \Delta \tau}{\partial Q} \Delta Q$$

Після підстановки значень часткових похідних отримуємо

$$\Delta_{\Delta \tau} = \frac{2LQ}{Fc^2} \Delta \varphi + \frac{2\varphi Q}{Fc^2} \Delta L - \frac{2L\varphi Q}{F^2c^2} \Delta F + \frac{2L\varphi}{Fc^2} \Delta Q$$

Відносну похибку визначаємо виразом:

$$\frac{\Delta_{\Delta\tau}}{\Delta\tau} = \frac{\frac{2LQ}{Fc^2} \Delta\varphi + \frac{2\varphi Q}{Fc^2} \Delta L - \frac{2L\varphi Q}{F^2c^2} \Delta F + \frac{2L\varphi}{Fc^2} \Delta Q}{\frac{2L\varphi Q}{Fc^2}}$$

після спрощення отримуємо [8, 13, 14тому пропоную так]:

$$\frac{\Delta_{\Delta\tau}}{\Delta\tau} = \frac{\Delta\varphi}{\varphi} + \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta F}{F} + \frac{\Delta Q}{Q}$$

РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ВИТРАТОМІРА

У даному розділі нам знадобиться промодельовати потік води в витратомірі для того, щоб побачити як рухається потік і отримати графіки розподілу швидкості та перепаду тиску.

SolidWorks – продукт компанії SolidWorks Corporation, САПР, інженерного аналізу та підготовки виробництва будь-якої складності та призначення. SolidWorks є ядром інтегрованого комплексу автоматизації підприємства, за допомогою якого здійснюється підтримка життєвого циклу виробу. Також можливе отримання графічних відображень фізичних процесів у виробі [8, 15].

Для того, щоб отримати вихідні графіки, нам знадобиться змодельовати рух потоку води в ультразвуковому витратомірі (вимірюється перепад тиску, швидкість руху).

3.1 Геометрична модель гідравлічного каналу витратоміра.

Для дослідження будуємо спрощену 3D модель ультразвукового витратоміра. Побудову моделі витратоміра починаємо з моделювання всіх деталей. Вихідними даними для моделювання є геометричні розміри деталей та фізичні властивості потоку.

Першим проектуємо корпус (Рис. 3.1). Саме він задає основну поведінку потоку, оскільки всередині корпусу знаходиться гідравлічний канал не звичайної форми (Рис. 3.2), по якому проходить рідина [8].

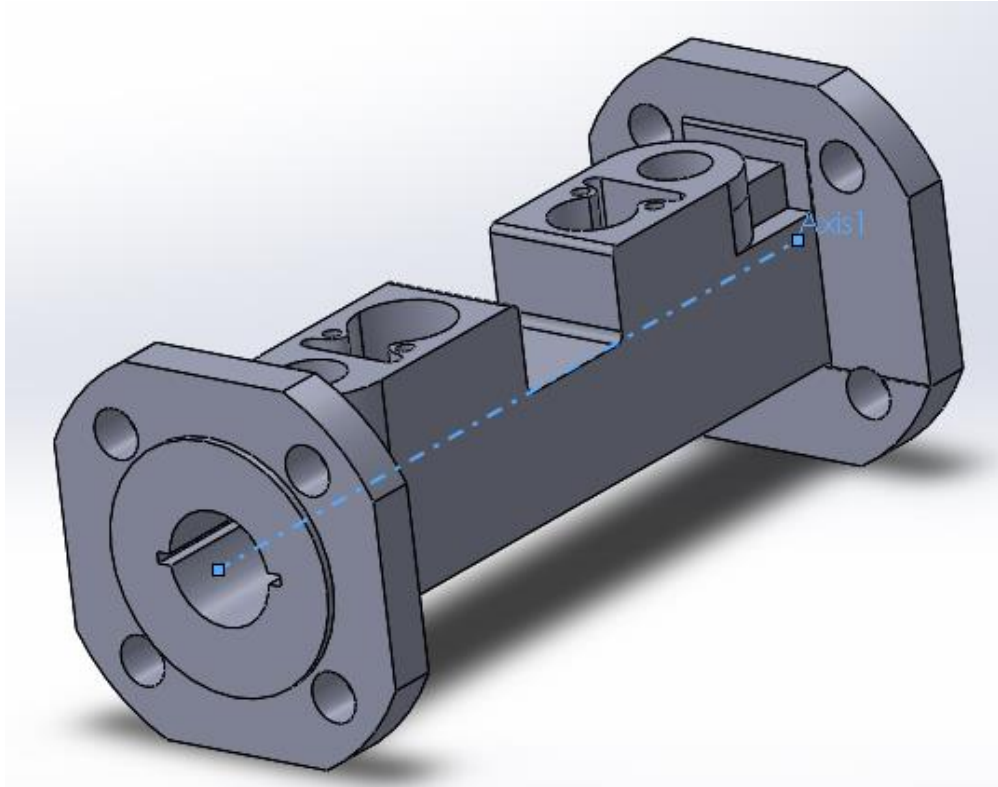


Рис. 3.1. Корпус

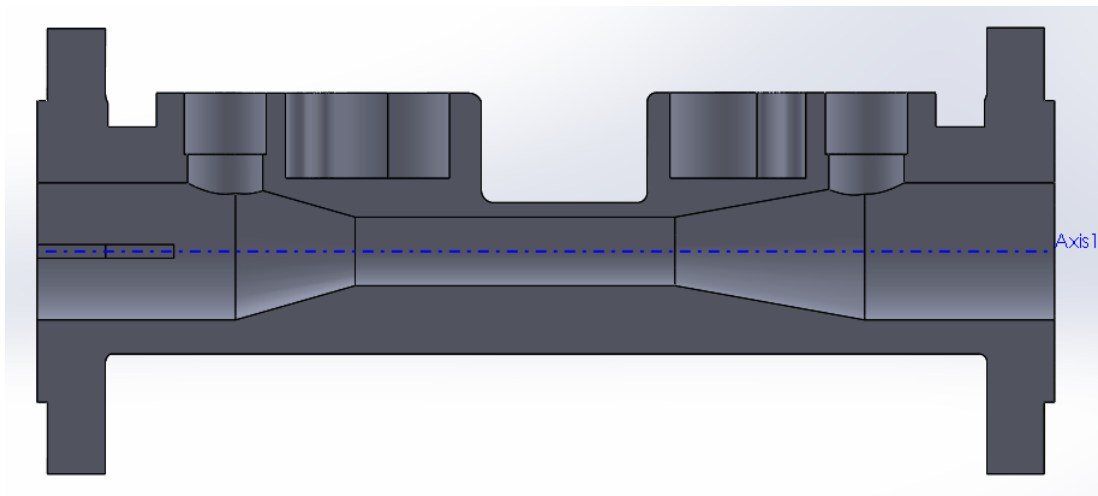


Рис. 3.2. Зображення гідравлічного каналу

Далі переходимо до проектування спрощеної моделі сенсора (Рис. 3.3), який розташовується на супротив потоку. Він чинить опір потоку рідини, саме тому змінюється швидкість потоку рідини на ділянці, де розташований сенсор. Далі нам потрібно сконструювати турбулізатор (Рис. 3.4), прискорює потік [8].

І на кінець, для моделювання потоку нам знадобляться дві заглушки (Рис. 3.5), які зможуть замкнути систему моделювання проливу [8].

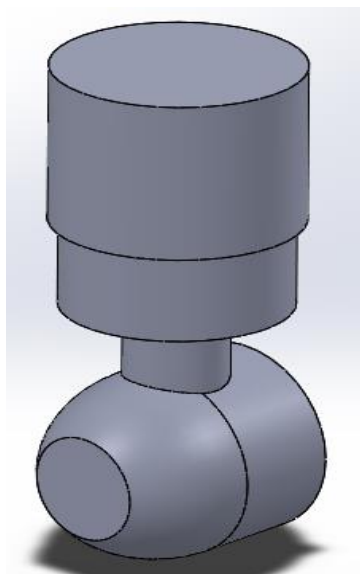


Рис. 3.3. Сенсор

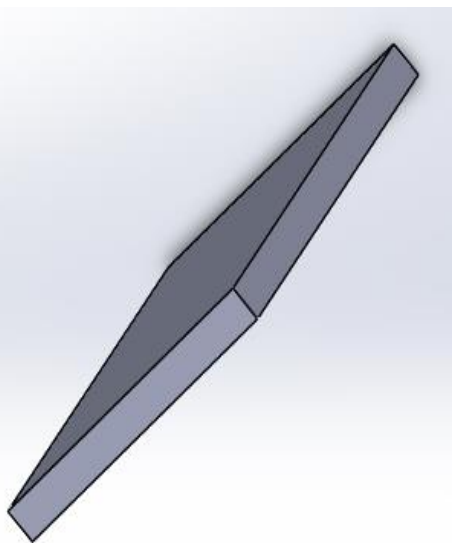


Рис. 3.4. Турбулізатор

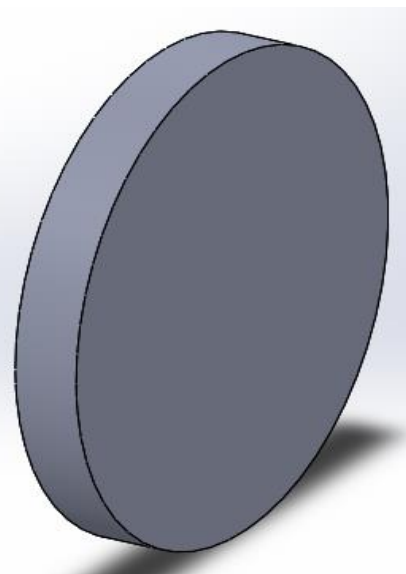


Рис. 3.5. Заглушка

Загалом, вже на цьому етапі можна складати спрощену 3D модель ультразвукового витратоміра (Рис. 3.6) і проводити моделювання плинності рідини через нього [8].

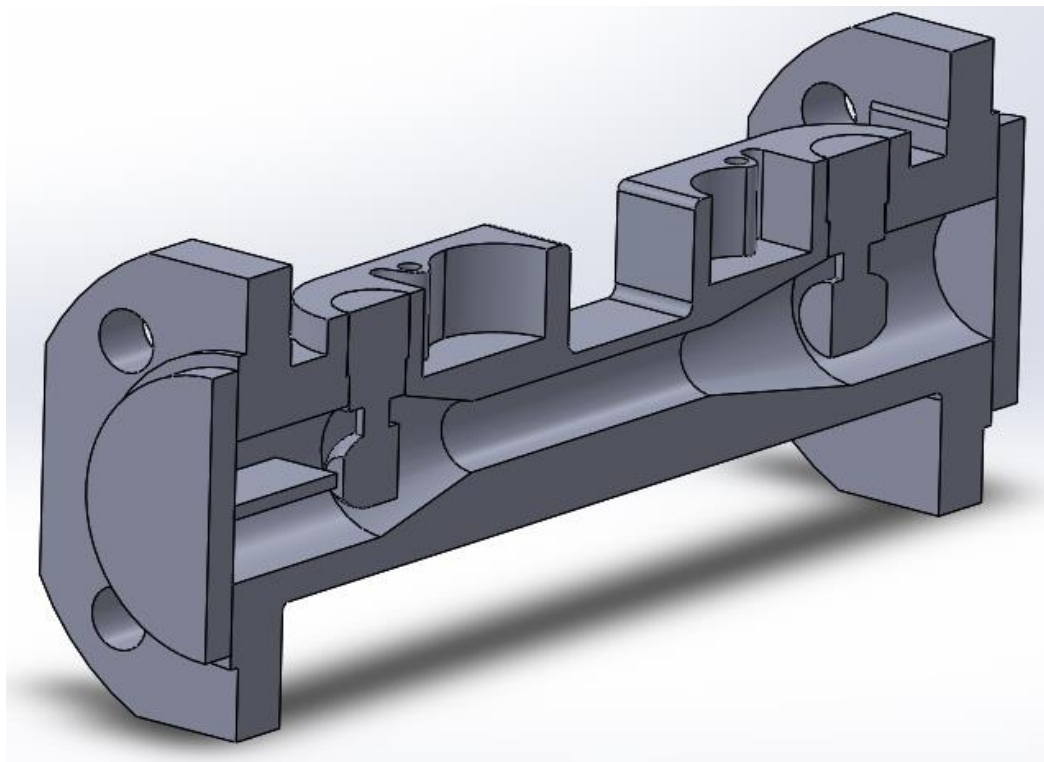


Рис. 3.6. Спрощена 3D модель ультразвукового витратоміра

3.2 Імітаційне моделювання витратоміра.

Для того щоб розпочати дослідження процесів необхідно задати початкові умови. Ця інформація задається по кроках командами програми моделювання Flow Simulation – Wizard. В спливаючому вікні на двох вкладках потрібно вибрати (Рис. 3.7) [8]:

- Систему одиниць SI;
- Тип рідини – вода.

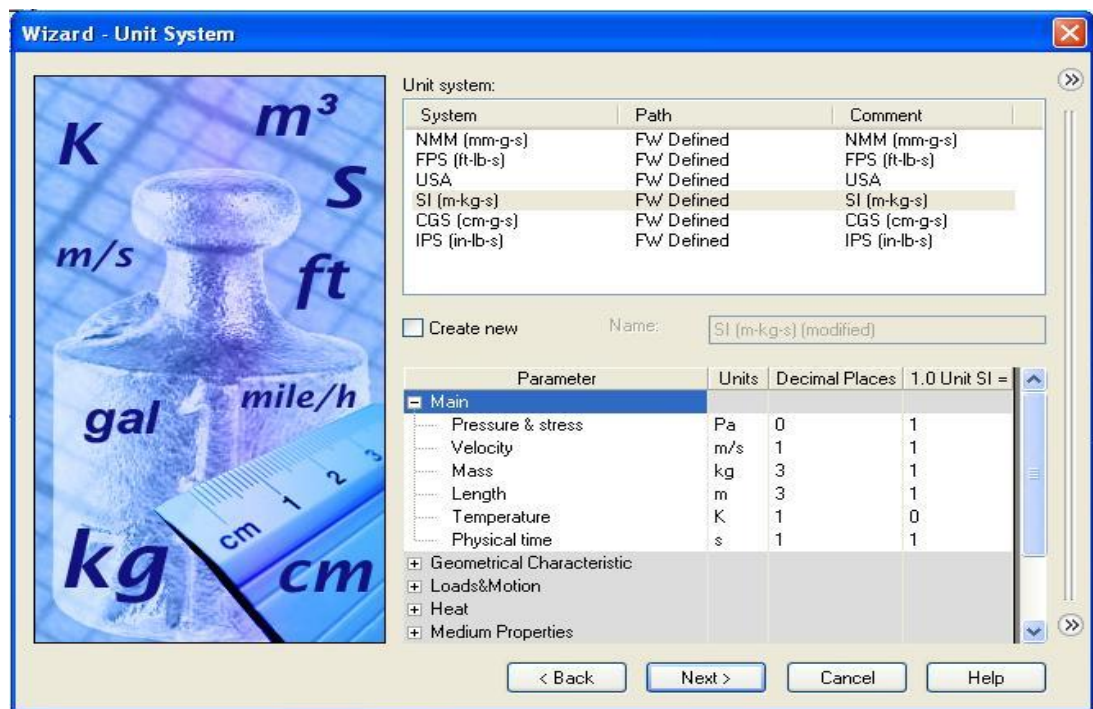


Рис. 3.7. Спливаюче вікно

Решту параметрів залишаємо без змін. Тепер запускаємо розрахунок проливу рідини через систему кнопкою Run.

Після формування проекту експерименту задаємо наступні граничні умови згідно вхідних даних:

1. витрату на вході в камеру $Q = 1 \text{ м}^3/\text{год} = 0,000278 \text{ м}^3/\text{с}$ (Inlet Velocity 1);
2. атмосферний тиск на виході із камери $P = 101325 \text{ Па}$ (Environment Pressure 1);

Всі данні вводяться в вкладці “Boundary Conditions” в лівому головному меню вхідних даних та границь (рис. 3.8) [8].

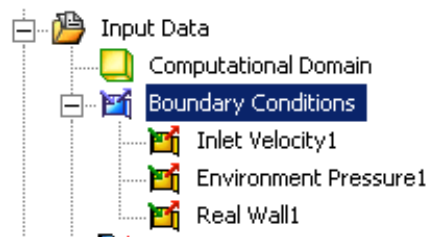


Рис. 3.8. Меню вхідних даних

Для зручності перегляду результатів експерименту проводимо переріз по осі витратоміра. Графіки розподілу параметрів, що характеризують фізичний процес проходження рідини через витратомір будуюмо на січних площинах [8].

На рис. 3.9 представлено діаграму розподілу швидкості плинину води.

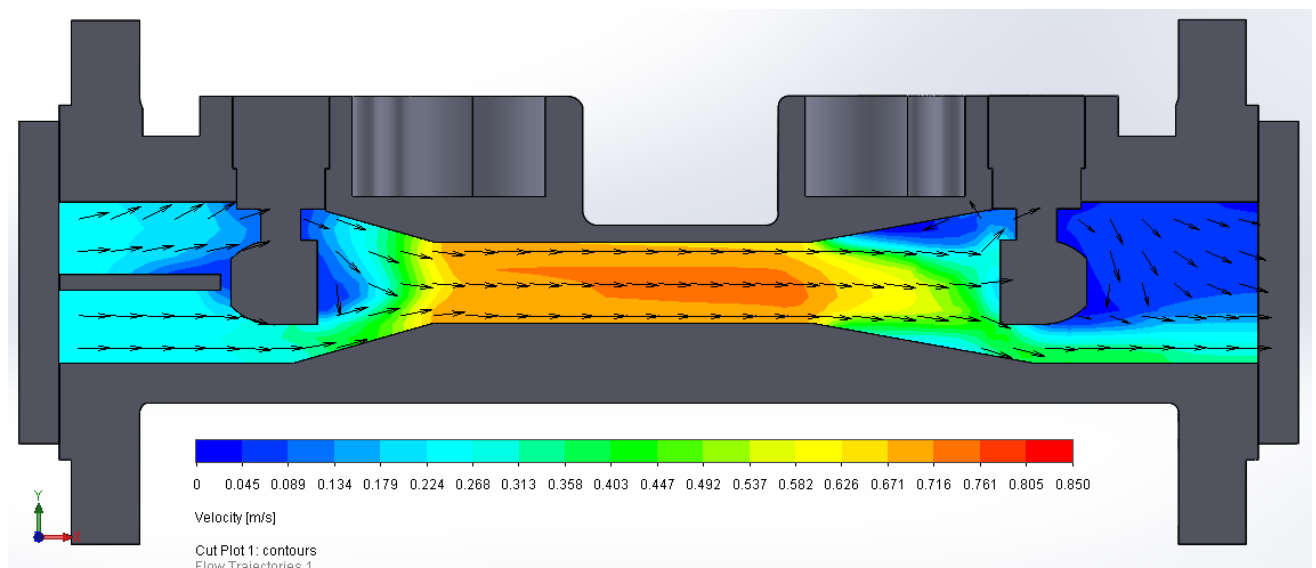


Рис. 3.9. Графік розподілу швидкості води за витрати $Q = 1 \text{ м}^3/\text{год}$

Як видно з графіку (3.9), максимальна швидкість потоку $V_{max} \sim 0,8 \text{ м/с}$. Це значення потрібно для розрахунку статичної характеристики.

РОЗДІЛ 4 РОЗРАХУНОК МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИТРАТОМІРА

4.1 Статична характеристика

Статична характеристика розраховується за виразом (2.4) – розрахунок різниці часу за деякої витрати, та (2.7) – розрахунок коефіцієнту φ . Обидві ці формули представлені в розділі 2. Вони мають відповідно такий вигляд [3, 4, 8]:

$$\Delta\tau = \varphi \frac{2L}{Fc^2} Q$$

$$\varphi = \frac{\frac{Q}{F}}{v_{max}}.$$

Попередньо визначаємо площу живого перерізу ділянки з максимальною швидкістю потоку для $r=0.02$ м (табл. 4.1)

$$F = \pi r^2 = 3,14 \cdot 0,02^2 = 0,0314 \text{ мм}^2$$

Теоретично дослідивши потік води у витратомірі можна підставити в формулу (2.7), вхідні та вихідні дані експерименту, виконаного при дослідженні процесу руху рідини в моделі витратоміра, для розрахунку коефіцієнту φ :

$$\varphi = \frac{\frac{0,000278}{0,0314}}{0,8} = 0,93 ,$$

де 0,000278 – це витрата у м³/с, яка дорівнює 1 м³/год

З урахуванням значення φ вираз для статичної характеристики набуває виду (рис. 4.1)

$$\Delta\tau = 0,93 \frac{2L}{Fc^2} Q$$

Таблиця 4.1. Геометричні характеристики гідравлічного каналу

Параметр	Значення
Відстань між датчиками, L [м]	0.19
Швидкість звуку в середовищі, C [м/с]	1500
Площа живого перерізу ділянки, F [м ²]	0,0314
Витрата, Q [м ³ /с]	0,000278



Рис. 4.1. Статична характеристика.

4.2 Перепад тиску

Розрахунок перепаду тиску проводиться у діапазоні зміни витрати від $Q_{\min} = 0,1 \text{ м}^3/\text{год}$ до $Q_{\max} = 20 \text{ м}^3/\text{год}$.

Характерною особливістю обраної схеми вимірювання є розташування випромінювачів-приймачів вздовж вісі потоку, що, поряд із компактністю конструкції, спричиняє додаткові втрати тиску (рис. 4.2).

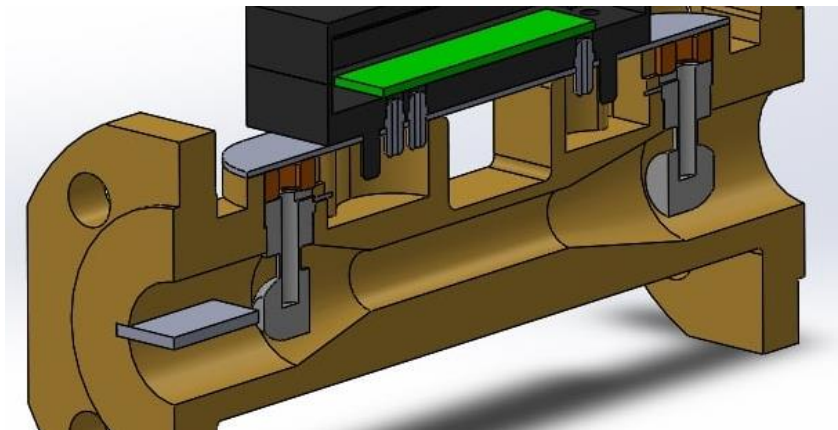


Рисунок 4.2. 3D-модель УЗВ

Основними елементами конструкції, що створюють перепад тиску, є конфузур і дифузур. Тому метою роботи є пошук конфігурації проточної частини УЗВ, яка дозволить зменшити втрати тиску.

Дослідження проведено для конфузурів з кутами від 8° до 29° за витрат 0,1; 1,0; 5,0 і $10,0 \text{ м}^3/\text{год}$ (рис. 4.3, рис. 4.4) [11].

Алгоритм проведення розрахунків із застосуванням ПЗ Mathcad представлений у додатку А.

Дифузورها ділянка досліджувалася для кутів від 6° до 20° (рис. 4.5, рис. 4.6).

Кут Витрата	$\alpha=8$	$\alpha=9$	$\alpha=10$	$\alpha=11$	$\alpha=12$	$\alpha=13$	$\alpha=14$	$\alpha=15$	$\alpha=16$	$\alpha=17$	$\alpha=18$
0,1	-2,441	-1,764	-1,222	-0,779	-0,41	-0,098	0,17	0,402	0,604	0,783	0,942
1	23,123	61,207	91,667	116,58	137,34	154,9	169,9	182,98	194,38	204,43	213,37
5	3421	4058	4567	4984	5331	5625	5876	6094	6285	6453	6602
10	17340	19480	21190	22590	23760	24750	25600	26330	26970	27530	28040

Кут Витрата	$\alpha=19$	$\alpha=20$	$\alpha=21$	$\alpha=22$	$\alpha=23$	$\alpha=24$	$\alpha=25$	$\alpha=26$	$\alpha=27$	$\alpha=28$	$\alpha=29$
0,1	1,084	1,212	1,328	1,433	1,528	1,616	1,697	1,771	1,84	1,904	1,964
1	221,36	228,54	235,04	240,95	246,34	251,27	255,81	260	263,87	267,47	270,81
5	6736	6856	6964	7063	7153	7236	7312	7382	7446	7507	7562
10	28490	28890	29260	29590	29890	30170	30420	30660	30880	31080	31270

Рис. 4.3. Результати розрахунків перепаду тиску на конфузурі

$$S_{ж3} = \pi R_1^2 = 3,14 \cdot 0,02^2 = 3,142 \cdot 10^{-4} (м^2)$$

α	$\alpha=6$	$\alpha=7$	$\alpha=8$	$\alpha=9$	$\alpha=10$	$\alpha=11$	$\alpha=12$	$\alpha=13$
0,1	4,04	3,915	3,812	3,724	3,646	3,575	3,51	3,45
1	377,498	368,83	361,39	354,76	348,71	343,09	337,78	332,731
5	9156	8979	8823	8681	8549	8423	8304	8188
10	36260	35610	35020	34480	33980	33500	33030	32580

α	$\alpha=14$	$\alpha=15$	$\alpha=16$	$\alpha=17$	$\alpha=18$	$\alpha=19$	$\alpha=20$
0,1	3,392	3,338	3,286	3,236	3,188	3,141	3,095
1	327,881	323,2	318,65	314,225	309,9	305,67	301,52
5	8076	7967	7860	7756	7653	7552	7453
10	32150	31720	31310	30900	30490	30090	29700

Рис. 4.6. Результати розрахунків перепаду тиску на дифузорі

Для покращення розподілу швидкості потоку запропоновано замінити конфузорну ділянку соплом Вітошинського у зв'язку із наявною неоднорідністю потоку вимірюваного середовища, що спостерігається за наявності конфузору [12].

Зміна радіусу обраного сопла описується наступною закономірністю [11, 16]

$$r_c(x) = \frac{r_2}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{r_2}{r_1}\right)^2\right] \frac{\left[1 - \left(\frac{x}{L_{1-2}}\right)^2\right]^2}{\left[1 + \left(\frac{x}{L_{1-2}}\right)^2\right]^3}}},$$

де r_1 – радіус входу; r_2 – радіус виходу; L_{1-2} – загальна довжина сопла Вітошинського ($L_{1-2} \geq r_1$).

Порівняння закономірностей зміни радіусу проточної частини УЗВ для конфузора і сопла показує, що за однакової ширини, вирівнювання потоку раніше відбувається у випадку застосування сопла Вітошинського (рис. 4.7).

У Solid Works Flow Simulation здійснено імітаційне моделювання конструкції, що підтвердило створення симетричної течії у гідравлічному каналі приладу (рис. 4.8, рис. 4.9).

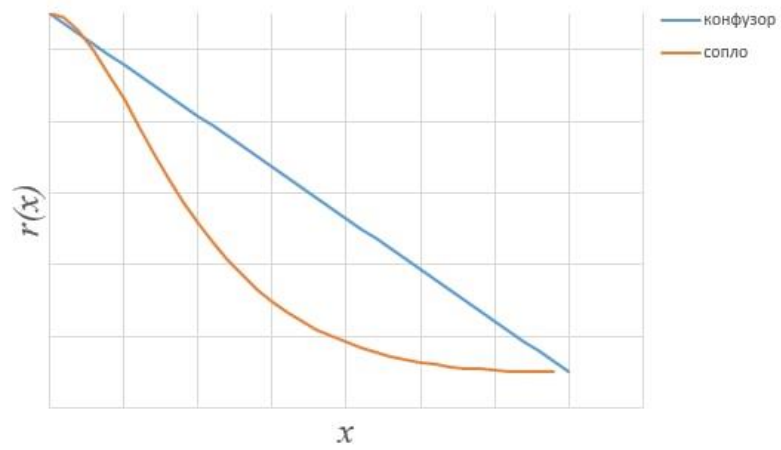
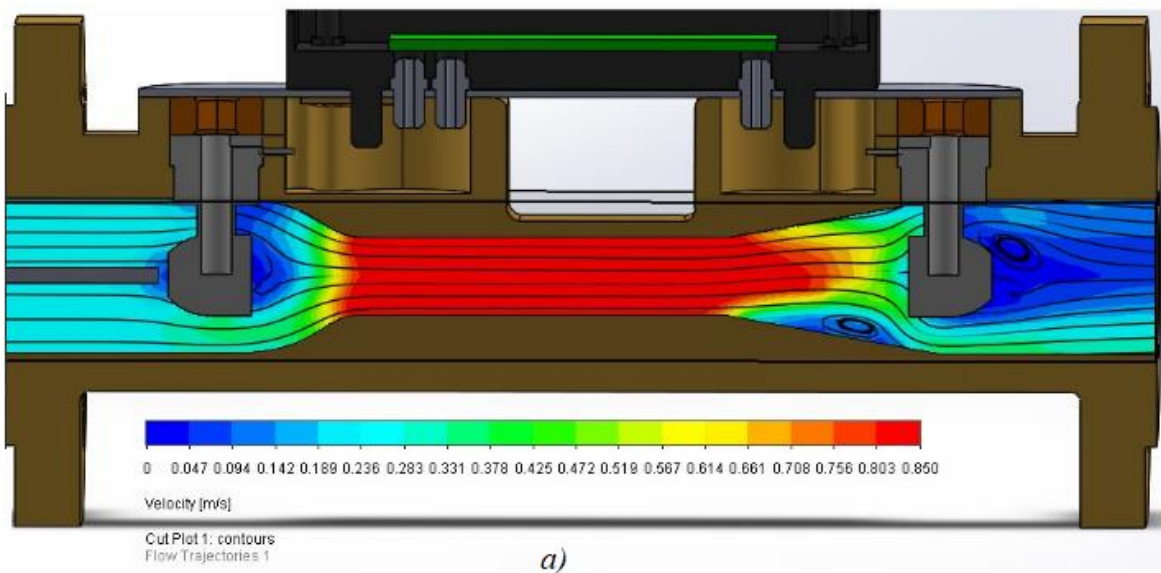
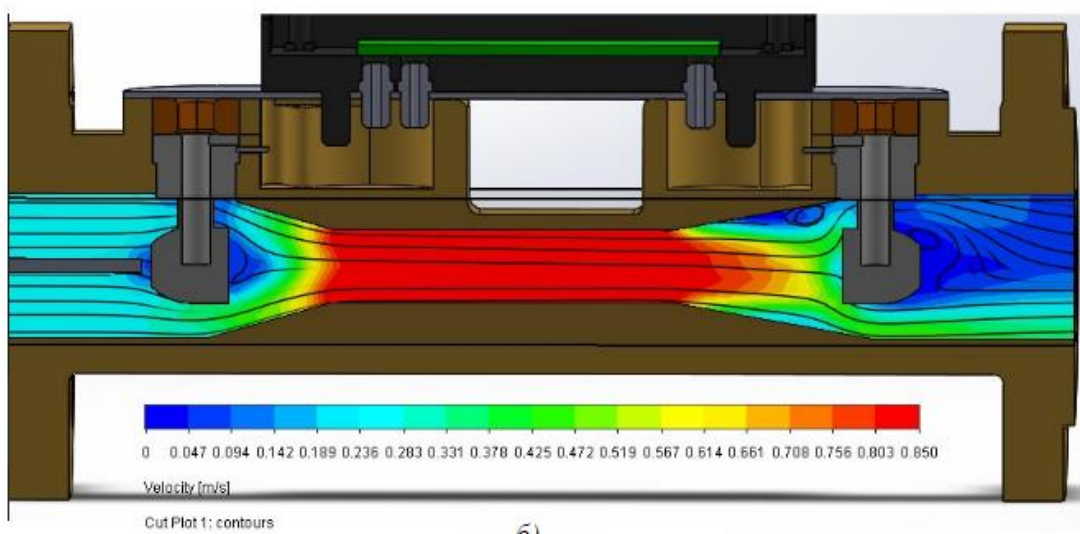


Рис. 4.7. Зміна радіусів досліджуваних ділянок



а)



б)

Рис. 4.8. Завихрення потоку: а) з соплом Вітошинського; б) з конфуззором

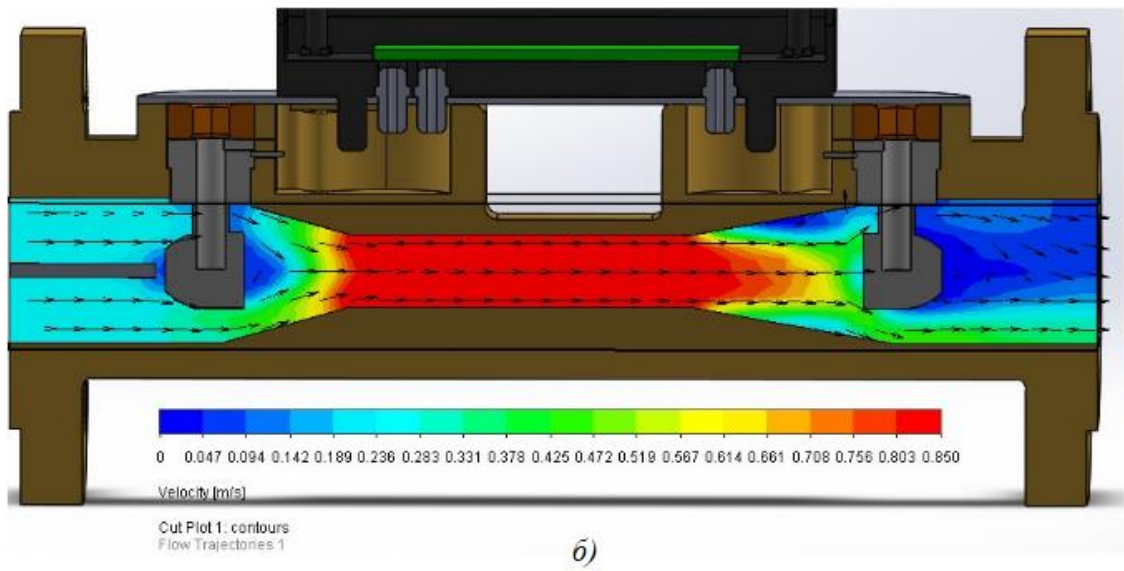
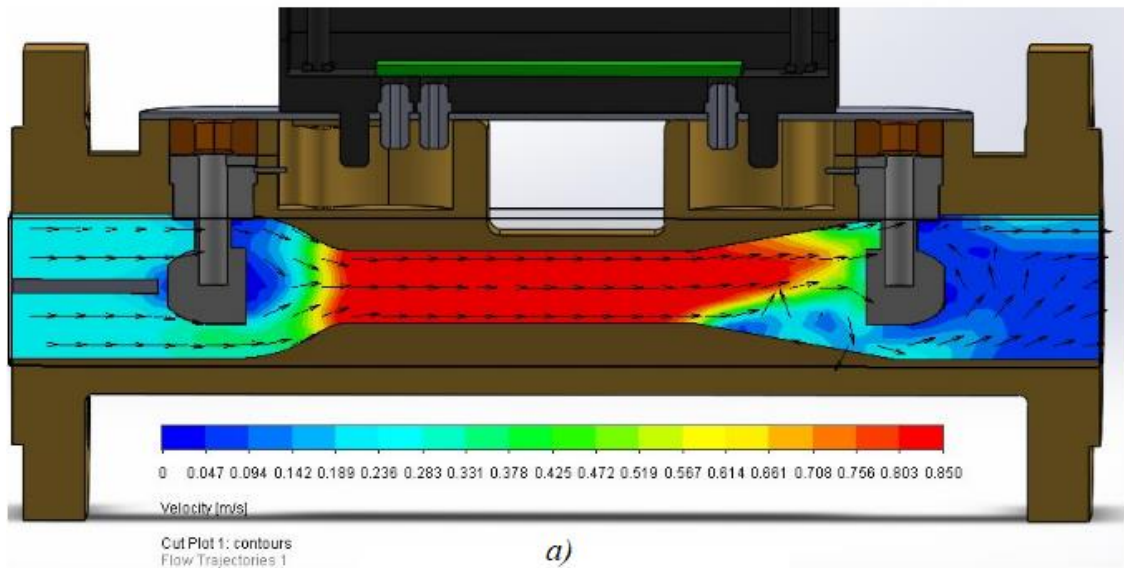


Рис. 4.7. Розподіл і напрямки швидкості потоку: а) з соплом Вітошинського;
б) з конфузоровим

Висновки

У роботі проаналізовано ультразвукові методи вимірювання витрати, розроблено математичну модель ультразвукового витратоміра, структурну та принципову схеми.

Здійснено розрахунки метрологічних характеристик ультразвукового витратоміра, а саме статичної характеристики та перепаду тиску.

Для зменшення втрати тиску у гідравлічному каналі витратоміра конфузорну ділянку замінено на сопло Вітошинського.

Поведені дослідження свідчать про наступне:

- Конфігурація гідравлічного каналу суттєво впливає на метрологічні характеристики ультразвукового витратоміра;
- Кут конфузора є основним фактором впливу на перепад тиску;
- Застосування сопла Вітошинського дозволяє отримати більш рівномірну епюру розподілу швидкості у поперечному перерізі потоку; вирівнювання епюри швидкості у такому випадку відбувається раніше, ніж при застосуванні конфузора, за однакових габаритних розмірів.

РОЗДІЛ 5. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП – ПРОЕКТУ «ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОНФІГУРАЦІЇ ГІДРАВЛІЧНОГО КАНАЛУ НА МЕТРОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВИТРАТОМІРА»

5.1. Опис ідеї проекту

В умовах реформування економіки та постійного подорожчання цін на паливно-енергетичні ресурси, виникла нагайна необхідність підвищення ефективності обліку води, що у свою чергу відповідає інтересам як споживачів, так і постачальників.

Одним із напрямів розв'язання такої задачі є точний контроль і облік води. Витратоміри на базі акустичних методів останнім часом використовують все частіше, тому що вони мають ряд переваг над витратомірами інших типів. Точність вимірювання витрати води залежить від багатьох факторів, це може бути як вплив зовнішнього середовища так і не рівномірність плинину води всередині гідравлічного каналу.

Оскільки в акустичних методах витрату пов'язують з середньою швидкістю потоку. Проблема не рівномірності плинину води перш за все впливає на точність. Для вирішення цієї проблеми застосовують різні схеми розміщення акустичних перетворювачів витрати, змінюють конфігурацію гідравлічного каналу, вводять гідродинамічні коефіцієнти, додають до конструкцій самих витратомірів випрямлячі потоку тощо. Ідея проекту заключається в дослідженні впливу конфігурації гідравлічного каналу на метрологічні характеристики ультразвукового витратоміра.

Такі дослідження будуть корисні для виробників приладів, проектних та монтажних організацій, що займаються вузлами обліку води, водопостачальних підприємств, а також для споживачів води. Покладаючись на результати цих досліджень можна надати рекомендації що до розробки та проектування витратомірів для максимально високої точності вимірювань.

В таблиці 5.1 наведено цілісне уявлення про зміст ідеї та можливі базові потенційні ринки, в межах яких потрібно шукати групи потенційних клієнтів.

Таблиця 5.1. Опис ідеї стартап-проекту

<i>Зміст ідеї</i>	<i>Напрямки застосування</i>	<i>Вигоди для користувача</i>
Дослідженні впливу конфігурації гідравлічного каналу на метрологічні характеристики ультразвукового витратоміра.	Транспортування води	Забезпечення більш високої точності обліку води
	Проектування приладів	Підвищення точності вимірювання, шляхом надання рекомендацій, що до монтажу приладу, внесення конструктивних змін у прилад з метою підвищення точності
	Проектування та монтаж ВОГ	Проектування та монтаж вузлів обліку газу спираючись на ці дослідження для підвищення точності обліку води
	Вимірювання витрати	Підвищення точності реєстрації витрати

Висновок: в таблиці приведені основні напрямки застосування запропонованих досліджень. Основними споживачами є представники виробників приладів, проектних та монтажних організацій, що займаються вузлами обліку води, водопостачальних підприємств, а також споживачі води.

В таблиці 5.2. наведено інформаційну карту проекту.

Таблиця 5.2. Інформаційна картка стартап-проекту

<i>Назва проекту</i>	Дослідження впливу конфігурації гідравлічного каналу на метрологічні характеристики ультразвукового витратоміра
<i>Автори</i>	Фотул Е.П., Писарець А.В.
<i>Анотація</i>	Пристрій дозволяє за рахунок зміни конструкції приладу отримувати релевантні вихідні дані.
<i>Терміни реалізації</i>	1 рік

<i>Необхідні ресурси</i>	Людські, фінансові, it – технології.
<i>Опис проблеми, яку вирішує стартап - проект</i>	Метрологічні характеристики УЗВ грають велику роль при розрахунку витрат, які на даний час кінцевого користувача не задовольняють в точності, похибках.
<i>Ціль</i>	Покращення метрологічних характеристик ультразвукового витратоміра.
<i>Очікуваний результат</i>	Зменшення витрат на комунальні послуги споживачів.

Далі буде визначений перелік слабких, сильних та нейтральних техніко-економічних характеристик (чим відрізняється від існуючих аналогів та замінників) та властивостей ідеї потенційного товару, що являється підґрунтям для формування його конкурентоспроможності. Аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї порівняно із пропозиціями конкурентів наведено в таблиці 5.3.

Таблиця 5.3. Визначення сильних, слабких характеристик ідеї проекту

№ п/п	Техніко- економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів			W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	Конкурен т 1	Конкурент 2			
1.	Похибка, %	<1%	≤1%	≤1 %		✓	
2.	Вартість, грн	10000	15000	1500 0			✓
3.	Розмір початкового капітало- вкладень, грн	300000- 550000	500000	500000	✓		
4.	Робочі витрати, м³/год	0,1...20	1...20	1...20			✓
5	Діаметри	20...100	40...200	40...200		✓	

Висновки: у порівнянні із головними конкурентами, перевагою методики є відношення вартості початкового капіталу, а також робочих витрат. У зв'язку з тим, що даний метод використовує новітні технології, вартість яких досить висока, слабкою стороною ідеї проекту являється необхідність у високому початковому капіталі для створення першого прототипу пристрою.

5.2. Технологічний аудит ідеї проекту

В таблиці 5.4 проводиться аудит технології, за допомогою якої можна реалізувати ідею проекту

Таблиця 5.4. Технологічна здійсненність ідеї проекту

<i>n/n</i>	<i>Ідея проекту</i>	<i>Технології її реалізації</i>	<i>Наявність технологій</i>	<i>Доступність технологій</i>
	Вплив неоднорідності потоку на вимірювання витрати	Врахування похибок які виникають за неоднорідності потоку у метод вимірювання витрати	Наявні	Доступна
	Вплив конструктивних елементів ВОГ на неоднорідність потоку	Моделювання впливу конструктивних елементів на неоднорідність потоку	Наявні	Доступна
	Вплив неоднорідності потоку на гідродинамічний коефіцієнт	Моделювання впливу конструктивних елементів на гідродинамічний коефіцієнт	Наявні	Доступна
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: Методика реалізації ідеї проекту спирається на моделювання неоднорідності потоку води за допомогою CFD технологій. При цьому це не потребує значних ресурсів і дозволяє проводити дослідження у широкому спектрі вхідних даних .				

З таблиці 5.4. обрано пункт 2 для реалізації ідеї проекту, тому що дана технологія дозволяє змінювати конструкцію приладу для отримання релевантних вихідних даних на відміну від технології зазначеної в пункті 3. Дана технологія являється доступною на ринку, що задовольняє необхідні характеристики до швидкодії.

5.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Рентабельність — поняття, що характеризує економічну ефективність виробництва, за якої за рахунок грошової виручки від реалізації продукції (робіт, послуг) повністю відшкодовує витрати на її виробництво й одержується прибуток як головне джерело розширеного відтворення.

Проведемо аналіз попиту: наявність попиту, обсяг, динаміка розвитку ринку (табл. 5.4.).

Таблиця 5.5. Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

<i>n/n</i>	<i>Показники стану ринку (найменування)</i>	<i>Характеристика</i>
	Кількість головних гравців, од	3
	Загальний обсяг продаж, грн..	5000000
	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Практичне застосування
	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	відсутні
	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	60

Суть одного із найважливіших методів оцінки економічної ефективності інвестицій полягає у розрахунку їх середньої рентабельності за формулою:

$$R = \frac{P}{I \times n} \times 100,$$

де Р - прибуток за час експлуатації проекту; / - повна сума інвестиційних витрат; п - час експлуатації проекту.

Інвестувати грошові засоби доцільно тоді, коли від цього можна отримати більший прибуток, ніж від їх зберігання у банку. Порівнюючи середньорічну рентабельність інвестицій зі ставкою банківського відсотка, можна дійти висновку, що вигідніше.

Висновки: за результатами складеної таблиці можна сказати, що вихід на ринок є рентабельним. Мала кількість гравців свідчить про легкий вхід на ринок. Високий процент рентабельності дає змогу швидко відбити затрачені кошти на розробку приладу.

Для отримання більш чіткої картини ситуації на ринку визначимо потенційні групи клієнтів (табл.5.6), їх характеристики, та формується орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи

Таблиця 5.6. Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

<i>№ п/п</i>	<i>Потреба, що формує ринок</i>	<i>Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)</i>	<i>Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів</i>	<i>Вимоги споживачів до товару</i>
1	Підвищення точності вимірювання витрати води	<ul style="list-style-type: none"> – Транспортування газу – Проектування приладів – Проектування та монтаж ВОГ – Вимірювання витрати 	Особливості, викликані зі специфікою проведення дослідів	<ul style="list-style-type: none"> - висока точність результатів вимірювання - надійність методу

Висновки: формування ринку визначається потребою підвищення точності вимірювання витрати газу. Основними користувачами методики є сфери транспортування газу, проектування приладів, проектування та монтаж ВОГ, вимірювання витрати. Головними вимогами до методики досліджень є максимальне підвищення точності спираючись на результати досліджень.

Ринкові можливості - це сприятливі обставини, які підприємство може використовувати для отримання переваг. Як приклад ринкових можливостей можна привести погіршення позицій конкурентів, різке зростання попиту, появу нових технологій виробництва продукції, зростання рівня доходів населення і т. п. Слід зазначити, що можливостями з погляду SWOT-аналізу є не всі можливості, які існують на ринку, а тільки ті, які можна використовувати.

Проведемо аналіз факторів ринкового середовища що сприяють ринковому впровадженню (табл. 5.7.) проекту, та факторів, що йому перешкоджають (табл. 5.8.). Результати введемо до таблиці.

Таблиця 5.7. Фактори можливостей

<i>№ n/n</i>	<i>Фактор</i>	<i>Зміст можливості</i>	<i>Можлива реакція компанії</i>
	Збільшення попиту	Різне збільшення зацікавленості до досліджень	Підвищення притягнення інвестицій
	Необхідність до інтеграції	Необхідність додати можливість розширення досліджень	Компанія може провести додаткові дослідження на замовлення.
	Освоєння нових сфер	Дослідження використовується у сферах, що не розглядалися	Створення спеціальної робочої групи задля модернізації методу досліджень для виконання поставлених вимог
	Індивідуальне замовлення	Клієнт потребує додання нових специфічних додатків	Оцінка затрат і вигоди компанії в даній ситуації. Погодження умов можливого контракту.
	Співпраця з конкурентами	Конкурент запропонував кооперацію	Оцінки можливих ризиків

Висновки: питання точності вимірювань є дуже актуальне тому і фактор збільшення попиту є найбільш реальним, даний вид досліджень може буди пристосованим і до вимірювання інший речовин, наприклад газу, для

досягнення результатів досліджень у інших напрямках можуть з'являтися спеціальні робочі групи, також є можливості проводити індивідуальні дослідження під конкретні вимоги, найменш привабливим фактором є співпраця з конкурентами, тому треба оцінювати ризики.

Ринкові загрози - події, настання яких може несприятливо вплинути на підприємство. Приклади ринкових загроз: вихід на ринок нових конкурентів, зростання податків, зміна смаків покупців, зниження народжуваності й т. п.

Таблиця 5.8. Фактори загроз

<i>№ n/n</i>	<i>Фактор</i>	<i>Зміст загрози</i>	<i>Можлива реакція компанії</i>
	Конкуренція	Поява конкуренту з більш привабливими цінами та результатами досліджень	Відтік клієнтів
	Економічний	Економічний стан країни де буде проходити дослідження	Додаткові витрати на дослідження
	Якість	Не належна якість проведення дослідів	Відмова від продукту
	Вартість досліджень	Підвищення вартості досліджень	Додаткові витрати на дослідження
	Патентні позови	Позови від компаній конкурентів	Відстоювання прав компанії

Висновки: одним з головних факторів загроз є конкуренція, також популярність продукту залежить від якості виконаних досліджень, також через не стабільний економічний стан країн де буде проводитись дослідження може зрости вартість досліджень, а це тягне за собою додаткові витрати.

Надалі проведемо аналіз пропозиції (табл. 5.9.), де визначимо загальні риси конкуренції на ринку.

Таблиця 5.9. Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

<i>Особливості конкурентного середовища</i>	<i>В чому проявляється дана характеристика</i>	<i>Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути</i>
---	--	---

		<i>конкурентоспроможною)</i>
1. Вказати тип конкуренції - чиста конкуренція	Мала кількість досліджень такого типу	- відповідність ринку - прогнозування - випереджати існуючі технології
2. За рівнем конкурентної боротьби міжнародний	Наявність замовників із інших держав	Міжнародний ринок
3. За галузевою ознакою - одногалузева	Використання в одній галузі	Робота менеджменту і реклами по залученню клієнтів
4. Конкуренція за видами товарів: - товарно-видова	Дослідження, що пропонується є одного виду	Клієнтно-орієнтована стратегія розвитку Адаптивність до умов ринку
5. За характером конкурентних переваг - цінова	Вартість залежить від методу дослідження	Пошук вигідного методу дослідження
6. За інтенсивністю - марочна	Вибір постачальника по результатам досліджень	Реклама точності досліджень

Висновки: на ринку присутня чиста конкуренція через малу кількість конкурентів, кожен з яких має свій метод досліджень. За рівнем конкурентної боротьби - міжнародний із одногалузевою ознакою. Конкуренція за видами товарів - видова.

Цінова конкуренція виникає, як правило, шляхом штучного збивання цін на дану продукцію. При цьому широко використовується цінова дискримінація, що має місце у тому числі, коли даний продукт продається за різними цінами і ці цінові відмінності не виправдані відмінностями у витратах. Цінова конкуренція найбільш часто застосовується у сфері послуг, при наданні послуг з транспортування продукції; при реалізації товару, який не піддається перерозподілу з одного ринку на інший (транспортування швидкопсувних продуктів з одного ринку на інший).

Нецінова конкуренція проводиться головним чином за допомогою вдосконалення якості продукції, технології виробництва, інновацій та нанотехнологій, патентування і брендування і умов її продажу, «сервізації» збуту. Цей вид конкуренції ґрунтується на прагненні захопити частину галузевого ринку шляхом випуску нових товарів, які або принципово відрізняються від своїх попередників, які представляють модернізований варіант старої моделі.

Після аналізу конкуренції проводиться більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі за моделлю п'яти сил М. Портера (табл. 5.10.)

Таблиця 5.10. Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

<i>Складові аналізу</i>	<i>Прямі конкуренти в галузі</i>	<i>Потенційні конкуренти</i>	<i>Постачальники</i>	<i>Клієнти</i>	<i>Товари-замінники</i>
	FlowAnaliss SistemFlowGas	EnergoAudit Gas lab	Ansys, Autodesk Dessaut	RGK GasMontazh	Аналогічні дослідження конкурентів
Висновки:	Конкуренція є відносно не великою	Вихід на ринок відносно простий. Наявні потенційні конкуренти.	Постачальники не мають диктувати ціни на ринку	Клієнти не диктують умови через велику зацікавленість до товару	Обмежень практично немає, оскільки маємо різні обмеження по використанню

На основі аналізу конкуренції, проведеного наведеного в табл. 5.10, а також із урахуванням характеристик ідеї проекту, що наведені в табл. 5.3, вимог споживачів до товару (табл. 5.6.) та факторів маркетингового середовища (табл. 5.7, 5.8) визначимо та обґрунтуємо перелік факторів конкурентоспроможності. Аналіз оформлено в табл. 5.11.

Таблиця 5.11. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

<i>n/n</i>	<i>Фактор конкурентоспроможності</i>	<i>Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)</i>
	Метод дослідження	Використання універсальних методів дослідження.
	Точність	Висока точність результатів при різних вхідних даних
	Адаптивність	Можливість гнучкого налаштування під конкретні задачі
	Модульність	Можливість комплексування із додатковими методами досліджень
	Ціна	Використання оптимальних методів дослідження для зменшення ціни

Висновки: оцінено основні фактори конкурентоспроможності. Всі вищезазначені фактори конкурентоспроможності досягаються завдяки використанню оптимальних та універсальних методів досліджень .

За визначеними факторами конкурентоспроможності (табл. 5.11) проводиться аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту (табл. 5.12).

Таблиця 5.12. Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін

<i>n/n</i>	<i>Фактор конкурентоспроможності</i>	<i>Бали 1-20</i>	<i>Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з EnergoAudit Gas lab</i>						
			<i>3</i>	<i>2</i>	<i>1</i>		<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
	Метод дослідження	18							<i>3</i>
	Точність	20			<i>1</i>				
	Адаптивність	17						<i>2</i>	

	Модульність	16							
	Ціна	18						2	

Висновки: спираючись на фактори конкурентоспроможності (Таблиця 5.10) та підсумовуючи рейтинг товару відносно головного конкурента, запропонована система має більший рейтинг відносно прямих конкурентів. Дана таблиця показує якими саме особливостями розроблена система відрізняються від аналогів та в яку саме сторону. Детальний аналіз показує що сильними сторонами є точність, можливість до адаптації з роботою із іншими методами досліджень.

Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу (матриці аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities), що наведено в таблиці 5.13. на основі виділених ринкових загроз та можливостей, та сильних і слабких сторін (табл. 5.12).

Таблиця 5.13. SWOT- аналіз стартап-проекту

<p>Сильні сторони:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Вища точність 2. Універсальні методи дослідження 3. Адаптивність 4. Модульність 5. Якість результатів 6. Ціна 	<p>Слабкі сторони:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Тривалість дослідження 2. Відносно нове ПЗ може мати недоліки 3. Нові методики досліджень можуть мати недоліки
<p>Можливості:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Вихід на міжнародний ринок 2. Збільшення попиту 3. Необхідність до інтеграції 4. Освоєння нових сфер 5. Індивідуальне замовлення 6. Співпраця з конкурентами 	<p>Загрози:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Конкуренція 2. Економічна нестабільність 3. Якість досліджень 4. Вартість досліджень 5. Патентні позови

Необхідно передбачати появу несприятливих умов, таких як поява нових пристроїв у конкурентів та мінливість ринку для можливості швидкої реакція та

зменшення наслідків. При цьому потрібно покращувати репутацію, за рахунок реклами та удосконалення з використанням нових технологій у пристрої.

На основі SWOT-аналізу розробимо альтернативи ринкової поведінки (перелік заходів) для виведення стартап-проекту на ринок та орієнтовний оптимальний час їх ринкової реалізації з огляду на потенційні проекти конкурентів, що можуть бути виведені на ринок. Визначені альтернативи аналізуються з точки зору строків та ймовірності отримання ресурсів (табл. 5.14).

Таблиця 5.14. Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

<i>n/n</i>	<i>Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки</i>	<i>Ймовірність отримання ресурсів</i>	<i>Строки реалізації</i>
	Індивідуалізм (максимізація власного виграшу)	Висока	3 міс.
	Кооперація (максимізація спільного виграшу)	Нижче середнього	2 міс.
	Суперництво	Середнє	4 міс.

Висновки: в результаті аналізу було обрано індивідуалізм, як альтернативну ринкову поведінку через те, що за відносно короткий термін існує велика ймовірність отримання ресурсів.

5.4. Розроблення ринкової стратегії проекту

Розробка ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів (табл. 5.15).

Таблиця 5.15. Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ n/ n	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Водопостачальні організації	-	+	низька	-
2	Проектно-монтажні організації	-	+	низька	+
3	Виробники приладів	+	+	низька	-
4	Споживачі води	+	+	висока	+
Які цільові групи обрано: під час вибору цільової групи до уваги бралось в першу чергу готовність споживача сприйняти продукт. Газотранспортні системи та проектно-монтажні організації потребують летального обґрунтування результатів досліджень.					

Головними споживачами даної продукції є водопостачальні організації. Що до наукового сегменту проявляє активність для збільшення точності і безпеки проведення операцій.

Для роботи в обраних сегментах ринку необхідно сформувати базову стратегію розвитку (табл. 5.16.).

Таблиця 5.15 Визначення базової стратегії розвитку

n/n	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
	Індивідуалізм	Стратегія недиференційова ного маркетингу	<ul style="list-style-type: none"> – Адаптація до вимог ринку – Використання 	Стратегія спеціалізації

			іновацій	
--	--	--	----------	--

Висновки: обрана стратегія розвитку спеціалізація через існування на ринку більш сильніших гравців. На перших кроках існування проекту доцільніше обрати стратегію спеціалізації та зайняти певну нішу на ринку.

Наступним кроком є вибір стратегії конкурентної поведінки (табл. 5.17).

Таблиця 5.16. Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ n/n	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
	Не є першопрохідцем	Буде шукати нових споживачів із поступовим переманюванням від конкурентів	Компанія буде проводити дослідження свого характеру	Стратегія виклику лідера

Висновок: оскільки даний проект не є першопрохідцем та має суттєві переваги по відношенню до свого прямого конкурента, можливо обрати стратегію виклику лідера. Це є можливим на фоні використання більш універсальних там менш дорогих методів досліджень.

На основі вимог споживачів з обраних сегментів до постачальника та до продукту, а також в залежності від обраної базової стратегії розвитку та стратегії конкурентної поведінки розробимо стратегію позиціонування (табл. 5.18).

Таблиця 5.18 - Визначення стратегії позиціонування

n/n	Вимоги до товару цільової	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможн і позиції власного	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту
-----	---------------------------------	---------------------------------	---	---

	<i>аудиторії</i>		<i>стартап-проекту</i>	<i>(три ключових)</i>
	Висока точність результатів	Стратегія спеціалізації	До слідження та розвиток	Високошвидкісна, легкість, надійність
	Надійність методики досліджень	Стратегія спеціалізації	Обслуговування	Здатна до комплексування
	Висока якість результатів	Стратегія спеціалізації	Якість	Високоточна

Висновки: даний проект позиціонується перш за все як проект для підвищення точності вимірювань, тому і якість результатів (зокрема їх точність) повинна бути на високому рівні. Надійність методики досліджень досягається за рахунок широкого діапазону вхідних даних.

5.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Першим кроком є формування маркетингової концепції товару, який отримає споживач табл. 5.19.

Визначення ключових переваг концепції потенційного товару є важливим етапом в розробленні стартап-проекту для задоволення потреб і забезпечують очікувані вигоди як для споживачів, так і для товаровиробників. Тому вигідними сторонами товару обрано високі характеристики стабільності, точності та швидкості, що надає перевагу даному пристрою у порівнянні з конкурентами.

Таблиця 5.19 - Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

<i>№ п/п</i>	<i>Потреба</i>	<i>Вигода, яку пропонує товар</i>	<i>Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)</i>
	Необхідність підвищення	Відносно дешевша та надійна методика	Якість, надійність, ціна результативність, конкретність

	точності вимірювання витрати води	досліджень дозволить високої точності	яка досягти
--	---	---	----------------

Висновки: за результатами таблиці дані переваги можна додати до рекламної компанії з залученням інвестицій.

Розробимо трирівневу маркетингову модель товару (табл. 5.20).

Таблиця 5.20 Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові			
I. Товар за задумом	Дослідження дає можливість клієнтам , отримати дані що до впливу неоднорідності потоку на точність вимірювання витрати води, та отримати рекомендації що до оптимальної схеми вузла обліку води для отримання найвищої точності вимірювання.			
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики			
	Точність вимірювання	< 1%	М	x
	Діапазон витрат	0.1...20 м³/год	М	x
	Діапазон діаметрів	20...100	М	x
	Діапазон тиску	0.1...1 МПа	М	x
	Діапазон температури	-20...30 °С	Нм	x
	Ціна	10000	М	
III. Товар із підкріпленням	До продажу комунікація з клієнтами для актуальності отриманих результатів			
	Після продажу заманювання нових інвестицій на нові дослідження, підтримка та обґрунтування і роз’яснення результатів			
Захист товару проводиться шляхом патентування методу досліджень, проведення заходів захисту програмних та методологічних.				

Висновки: характеристики закладені у 2-му рівні роблять дане дослідження унікальним серед його конкурентів. Патентування програмних та методологічних рішень слугує захистом від копіювання. Для спрощення задачі первинного орієнтування і представлення проекту в цілому було розроблено трирівневу маркетингову модель товару, що відображають складові задуму розробки та реальні характеристики. Чітко поставлена задача у досягненні високої швидкості та точності для можливості вирізнення запропонованого товару від товарів аналогів.

Наступним кроком визначимо цінові межі (табл. 5.21).

Таблиця 5.21 - Визначення меж встановлення ціни

<i>n/n</i>	<i>Рівень цін на товари-замінники (грн.)</i>	<i>Рівень цін на товари-аналоги (грн.)</i>	<i>Рівень доходів цільової групи споживачів (грн.)</i>	<i>Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар (грн.)</i>
	15000-20000	15000-20000	100000-1000000	10000-15000

Висновки: обрано середню цінову категорію так як висока ціна може злякати потенційних клієнтів.

Наступним кроком є визначення оптимальної системи збуту, в межах якого приймається рішення (табл. 5.22).

Таблиця 5.22 Формування системи збуту

<i>n/n</i>	<i>Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів</i>	<i>Функції збуту, які має виконувати постачальник товару</i>	<i>Глибина каналу збуту</i>	<i>Оптимальна система збуту</i>
1	Продаж	Продаж результатів досліджень з їх обґрунтуванням та роз'ясненням	Нульового рівня	Прямий
2	Інвестиції	Залучення інвестицій на дослідження з подальшим	Нульового рівня	Прямий

		їх переданням інвесторам		
--	--	--------------------------	--	--

Висновки: основними каналами збуту продаж та залучення інвестицій. Через відсутність виробництва та використання комп'ютерних технологій для проведення досліджень обрано нульовий рівень глибини каналу та прямий збут, без залучення посередників між виробником та споживачем. Для економії коштів попереднє замовлення буде проводитися за допомогою електронного сайту. Виробник буде забезпечувати контроль за доставкою в строки та без пошкоджень.

Останньою складовою маркетингової програми є розроблення концепції маркетингових комунікацій, що спирається на попередньо обрану основу для позиціонування, визначену специфіку поведінки клієнтів.

Визначення ідеї та теми рекламного звернення зумовлює всі наступні етапи планування рекламної діяльності. Тому цей етап є основним для професіоналів — творчих працівників рекламних агенцій чи рекламних підрозділів підприємств. Один із класиків рекламного бізнесу Д. Огілві радить ретельно вивчити те, що необхідно рекламувати: «Отримавши завдання на рекламування автомобіля «Роллс Ройс», я витратив три тижні на вивчення цієї моделі. І тоді народилася ідея, яка втілилась у рекламному зверненні: на швидкості 60 миль за годину найголосніший звук, який можна почути в машині, — цокання годинника»

Таблиця 5.22 Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1.	Зростання ціни на воду спонукає до	-Інтернет -Фахові видання -Соц. мережі	-Висока якість результатів -Широкий діапазон вхідних	Донесення можливості прибутку за допомогою	Показ можливостей підвищення точності за

	більш точного її обліку		даних -Низька вартість	цього засобу	допомогою даних досліджень. Висвітлюванн я переваг
--	-------------------------------	--	---------------------------	--------------	--

Висновки: Метою маркетингової комунікації є донесення до клієнтів та інвесторів, переваг саме цього методу досліджень та запевнення у якості його результатів. Вся медіа реклама спрямована на подачу клієнтам інформації, що саме цей метод досліджень допоможе їм заощадити гроші шляхом підвищення точності обліку.

5.6. Висновок до розділу 5

Одним з важливих етапів будь-якої наукової роботи є її подальше практичне застосування та комерційна реалізація. Сьогодні будь-яке дослідження, результатом якого є покращення того чи іншого показника, або нове наукове відкриття можна подати у вигляді бізнес моделі, продукту, який можна продати, або залучити інвестиції для його розробки.

Першим кроком розробки бізнес моделі є формування ідеї проекту. Правильне формування ідеї проекту допоможе в наступних етапах його розробки. У цьому розділі було наведено ідею проекту, представлено сторін які мають зацікавленість та наведено ризики які можуть виникнути під час реалізації проекту. Також було наведено сильні та слабкі сторони цього проекту, виходячи з яких йде формування конкурентоспроможності даної ідеї як продукту на ринку. Розглянуто негативні та позитивні фактори впливу на продукт та наведено стислу характеристику конкурентних продуктів. Аналіз переваг свого продукту та того, що пропонують конкуренти дає можливість вибрати ніші ринку які буде займати ваш продукт.

Данна ідея заключається в тому, що як продукт продається дослідження впливу конфігурації гідравлічного каналу на метрологічні характеристики ультразвукового витратоміра, дане дослідження є актуальним на фоні постійного подорожчання комунальних послуг. Цей продукт може

реалізуватись як за рахунок інвестицій на дослідження, так і за рахунок продажу результатів досліджень з подальшим їх обґрунтуванням і реалізацією на практиці.

У реалізації даного продукту важливу роль відіграє маркетингова складова, яка за рахунок висвітлення переваг даного продукту дає перевагу над продуктами конкурентів. Вся медіа реклама спрямована на подачу клієнтам інформації, що саме цей метод досліджень допоможе їм заощадити гроші шляхом підвищення точності обліку.

Отже розглянувши всі аспекти ринку, можна зробити висновки, що подальша реалізація проекту можлива . Але для цього треба мати переваги над проектами конкурентів, та вміло їх подавати у вигляді рекламної інформації .

ВИСНОВКИ

Проведені у роботі дослідження дозволяють поглибити уявлення про дослідження метрологічних характеристик витратоміра.

Головний зміст отриманих результатів може бути окреслений наступним.

1. Узагальнені наявні відомості ультразвукові методи вимірювання витрати. Обґрунтовано доцільність і необхідність вдосконалення гідравлічного каналу одноканального час-імпульсного ультразвукового витратоміра, в якому приймачі-випромінювачі розташовано вздовж вісі потоку.

2. Побудовано математичну модель втрати тиску у гідравлічному каналі витратоміра.

3. Проведено теоретичні дослідження втрати тиску витратоміра за різних конфігурацій гідравлічного каналу. Запропоновано конфузорну ділянку корпусу замінити соплом Вітошинського, що ефективно виправляє асиметрію течії вимірюваного середовища, викликану встановленням ультразвукових сенсорів.

4. Здійснено імітаційне моделювання конструкції у системі Solid Works Flow Simulation, що підтвердило створення симетричної течії у гідравлічному каналі приладу.

5. Розроблено стартап – проект, що обґрунтовує можливості подальшої комерціалізації отриманих результатів та застосування розробленої концепції у промисловості.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Хансуваров К.И. Техника измерения давления, расхода, количества и уровня жидкости, газа и пара/ К.И. Хансуваров, В.Г. Цейтлин. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 287 с.
2. Чистяков В.С. Краткий справочник по теплотехническим измерениям/ В.С. Чистяков. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.
3. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества веществ: справочник. Кн. 1/ под общ. ред. Е.А. Шорникова. – СПб.: Политехника, 2002. – 409 с.
4. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества веществ: справочник: Кн. 2/ под общ. ред. Е.А. Шорникова. – СПб.: Политехника, 2004. – 412 с.
5. Биргер Г.И., Бражников Н. И. Ультразвуковые расходомеры./Биргер Н.И. – М.: Металлургия, 1964. – 323с.
6. Писарець А. В. Вимірювання кількості теплової енергії із застосуванням ультразвукового методу / А. В. Писарець, С. О. Поліщук // Вісник НТУУ "КПІ". Серія приладобудування. – 2017. – Вип. 53(1). – С. 56 – 61
7. [Електронний ресурс] : Електросам [Веб-сайт].–
<https://electrosam.ru/glavnaja/slabotochnye-seti/oborudovanie/ultrazvukovye-datchiki/> Режим доступу: Вільний
8. Фотул, Е. П. Ультразвуковий витратомір: дипломний проект... бакалавра:6.051003 Приладобудування / Фотул Едуард Петрович. - Київ, 2019. - 63 с.
9. Рабинович Е.З. Гидравлика 4-е издание. — Москва: Государственное Издательство физико-математической литературы, 1963. – 404 с.
10. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям/ Под ред. М. О. Штейнберга.— 3-е изд., перераб. и доп.— М.; Машиностроение, 1992.— 672 с
11. Приладовий комплекс вимірювання витрати та кількості природного газу на підґрунті різних фізичних методів вимірювання / І. В. Коробко, О. О.

- Драчук, В. А. Коваленко // Методи та прилади контролю якості. – 2014. – № 2. – С. 66-77.
12. Фотул Е.П. Дослідження впливу конфігурації гідравлічного каналу на метрологічні характеристики ультразвукового витратоміра / Е.П. Фотул, А. В. Писарець // Збірник праць XVI Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених “ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ ІНЖЕНЕРНИХ РІШЕНЬ У ПРИЛАДОБУДУВАННІ ”, ПБФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського. – 2020. – 456с.
13. Точность средств измерений / С. П. Полишко, А. Д. Трубенюк. – К.: Выща школа, 1988. – 149 с.
14. Основы метрологии / Г. Д. Бурдун, Б. Н. Марков. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 322 с.
15. [Електронний ресурс] :Wikipedia [Веб-сайт].–
<https://ru.wikipedia.org/wiki/SolidWorks> Режим доступу: Вільний
16. Н. Ф. Краснов, В. Н. Кошевой, А. Н. Данилов, В. Ф. Захарченко, Е. Э. Боровский, А. И. Хлупнов. Прикладная аэродинамика. Под ред. Краснова Н. Ф. Учеб. пособие для вузов. М.: Высшая школа, 1974, 732 с.
- 17.

Додатки

Додаток А

$$p0 := 1000000 \quad g := 9.8 \quad v := 1.006 \cdot 10^{-6} \quad \rho := 1000$$

$$Q := \frac{0.1}{3600}$$

$$r1 := 0.02$$

$$r2 := 0.01$$

$$r4 := r1$$

$$r3 := r2$$

$$l1 := 0.058$$

$$L_{\text{конфузора}} := 0.054$$

$$l3 := 0.0935$$

$$l5 := l1$$

$$\varphi := \begin{bmatrix} 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \\ 10 \\ 11 \\ 12 \\ 13 \\ 14 \\ 15 \\ 16 \\ 17 \\ 18 \\ 19 \\ 20 \end{bmatrix}$$

$$\varphi_{\text{rad}} := \frac{\varphi \cdot \pi}{180 \cdot 2} =$$

$$\begin{bmatrix} 0.052 \\ 0.061 \\ 0.07 \\ 0.079 \\ 0.087 \\ 0.096 \\ 0.105 \\ 0.113 \\ 0.122 \\ 0.131 \\ 0.14 \\ 0.148 \\ 0.157 \\ 0.166 \\ 0.175 \end{bmatrix}$$

$$L_{\text{диффузора}} := \frac{r4 - r3}{\text{tg} \varphi_{\text{rad}}} =$$

$$\begin{bmatrix} 0.191 \\ 0.163 \\ 0.143 \\ 0.127 \\ 0.114 \\ 0.104 \\ 0.095 \\ 0.088 \\ 0.081 \\ 0.076 \\ 0.071 \\ 0.067 \\ 0.063 \\ 0.06 \\ 0.057 \end{bmatrix}$$

$$\text{tg} \varphi_{\text{rad}} := \tan(\varphi_{\text{rad}}) =$$

$$\begin{bmatrix} 0.052 \\ 0.061 \\ 0.07 \\ 0.079 \\ 0.087 \\ 0.096 \\ 0.105 \\ 0.114 \\ 0.123 \\ 0.132 \\ 0.141 \\ 0.149 \\ \vdots \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
S1 &:= \pi \cdot r1^2 & Vser1 &:= \frac{Q}{S1} & x1 &:= r1 & Re1 &:= \frac{Vser1 \cdot x1}{v} & \lambda t1 &:= \frac{0.3164}{Re1^{0.25}} = 0.069 \\
S2 &:= \pi \cdot r2^2 & & & & & & & & \\
S3 &:= S2 & Vser2 &:= \frac{Q}{S2} & x2 &:= r2 & Re2 &:= \frac{Vser2 \cdot x2}{v} & \lambda t2 &:= \frac{0.3164}{Re2^{0.25}} = 0.058 \\
S4 &:= S1 & & & & & & & & \\
& & Vser3 &:= Vser2 & x3 &:= x2 & Re3 &:= \frac{Vser3 \cdot x3}{v} & \lambda t3 &:= \frac{0.3164}{Re3^{0.25}} = 0.058 \\
& & & & & & & & & \\
Rr1 &:= r1 & Vser4 &:= Vser1 & x4 &:= x1 & Re4 &:= \frac{Vser4 \cdot x4}{v} & \lambda t4 &:= \frac{0.3164}{Re4^{0.25}} = 0.069
\end{aligned}$$

$$Rr2 := r2$$

$$Rr3 := Rr2$$

$$Rr4 := Rr1$$

$$\lambda_{\text{KOH}\phi} := \frac{0.3164}{Re2^{0.25}}$$

$$n1 := \frac{r2^2}{r1^2} = 0.25$$

$$\gamma1 := \text{atan}\left(\frac{r1 - r2}{L_{\text{KOH}\phi\text{узора}}}\right)$$

$$hl01 := \frac{\lambda t1}{4 \cdot Rr1} \cdot \frac{Vser1^2}{2 \cdot g} \cdot l1 = 1.249 \cdot 10^{-6}$$

$$p1 := p0 - hl01$$

$$\lambda_{\text{дифузора}} := \frac{0.3164}{Re4^{0.25}}$$

$$n2 := \frac{r3^2}{r4^2} = 0.25$$

$$\gamma2 := \text{atan}\left(\frac{r3 - r4}{L_{\text{дифузора}}}\right)$$

$$\xi12 := \frac{\lambda_{\text{KOH}\phi}}{8 \cdot \sin(\gamma1)} \cdot \left(1 - \frac{1}{n1^2}\right)$$

$$p2 := p0 + \frac{\rho \cdot Vser1^2}{2} \cdot \left(1 - \frac{S1^2}{S2^2} \cdot (1 + \xi12)\right)$$

$$hl45 := \frac{\lambda t4}{4 \cdot Rr4} \cdot \frac{Vser4^2}{2 \cdot g} \cdot L_{\text{дифузора}}$$

$$hl23 := \frac{\lambda t3}{4 \cdot Rr3} \cdot \frac{Vser3^2}{2 \cdot g} \cdot l3 = 5.418 \cdot 10^{-5} \quad \xi34 := \frac{\lambda_{\text{дифузора}}}{8 \cdot \sin(\gamma2)} \cdot \left(\frac{n2^2 - 1}{n2^2}\right) + \left(\frac{n2 - 1}{n2}\right)^2 \cdot \sin(\gamma2 \cdot 2)$$

$$p3 := p2 - hl23 = 9.9999867427 \cdot 10^5$$

$$p4 := p3 + \frac{\rho \cdot Vser3^2}{2} \cdot \left(1 - \frac{S3^2}{S4^2} \cdot (1 + \xi34)\right)$$

$$p5 := p4 - hl45$$

$$\Delta P := p5 - p1 = \begin{bmatrix} 1.964 \\ 2.088 \\ 2.191 \\ 2.279 \\ 2.358 \\ 2.428 \\ 2.493 \\ 2.554 \\ 2.611 \\ 2.666 \\ 2.718 \\ 2.768 \\ 2.816 \\ 2.863 \\ 2.909 \end{bmatrix}$$

$$p0 := 1000000 \quad g := 9.8 \quad v := 1.006 \cdot 10^{-6} \quad \rho := 1000$$

$$Q := \frac{1}{3600} \quad r1 := 0.02 \quad l1 := 0.058$$

$$r2 := 0.01 \quad L_{\text{конфузора}} := 0.054$$

$$r4 := r1 \quad l3 := 0.0935$$

$$r3 := r2 \quad l5 := l1$$

$$\varphi := \begin{bmatrix} 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \\ 10 \\ 11 \\ 12 \\ 13 \\ 14 \\ 15 \\ 16 \\ 17 \\ 18 \\ 19 \\ 20 \end{bmatrix} \quad \varphi_{\text{rad}} := \frac{\varphi \cdot \pi}{180 \cdot 2} = \begin{bmatrix} 0.052 \\ 0.061 \\ 0.07 \\ 0.079 \\ 0.087 \\ 0.096 \\ 0.105 \\ 0.113 \\ 0.122 \\ 0.131 \\ 0.14 \\ 0.148 \\ 0.157 \\ 0.166 \\ 0.175 \end{bmatrix}$$

$$L_{\text{дуфузора}} := \frac{r4 - r3}{tg \varphi_{\text{rad}}} = \begin{bmatrix} 0.191 \\ 0.163 \\ 0.143 \\ 0.127 \\ 0.114 \\ 0.104 \\ 0.095 \\ 0.088 \\ 0.081 \\ 0.076 \\ 0.071 \\ 0.067 \\ 0.063 \\ 0.06 \\ 0.057 \end{bmatrix} \quad tg \varphi_{\text{rad}} := \tan(\varphi_{\text{rad}}) = \begin{bmatrix} 0.052 \\ 0.061 \\ 0.07 \\ 0.079 \\ 0.087 \\ 0.096 \\ 0.105 \\ 0.114 \\ 0.123 \\ 0.132 \\ 0.141 \\ 0.149 \\ \vdots \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
S1 &:= \pi \cdot r1^2 & Vser1 &:= \frac{Q}{S1} & x1 &:= r1 & Re1 &:= \frac{Vser1 \cdot x1}{v} & \lambda t1 &:= \frac{0.3164}{Re1^{0.25}} = 0.039 \\
S2 &:= \pi \cdot r2^2 & & & & & & & & \\
S3 &:= S2 & Vser2 &:= \frac{Q}{S2} & x2 &:= r2 & Re2 &:= \frac{Vser2 \cdot x2}{v} & \lambda t2 &:= \frac{0.3164}{Re2^{0.25}} = 0.033 \\
S4 &:= S1 & & & & & & & & \\
& & Vser3 &:= Vser2 & x3 &:= x2 & Re3 &:= \frac{Vser3 \cdot x3}{v} & \lambda t3 &:= \frac{0.3164}{Re3^{0.25}} = 0.033 \\
Rr1 &:= r1 & Vser4 &:= Vser1 & x4 &:= x1 & Re4 &:= \frac{Vser4 \cdot x4}{v} & \lambda t4 &:= \frac{0.3164}{Re4^{0.25}} = 0.039
\end{aligned}$$

$$Rr2 := r2$$

$$Rr3 := Rr2$$

$$Rr4 := Rr1$$

$$\lambda_{\text{KOH}\phi} := \frac{0.3164}{Re2^{0.25}}$$

$$n1 := \frac{r2^2}{r1^2} = 0.25$$

$$\gamma1 := \text{atan}\left(\frac{r1 - r2}{L_{\text{KOH}\phi\text{yзop}\alpha}}\right)$$

$$hl01 := \frac{\lambda t1}{4 \cdot Rr1} \cdot \frac{Vser1^2}{2 \cdot g} \cdot l1 = 7.024 \cdot 10^{-5}$$

$$p1 := p0 - hl01$$

$$\lambda_{\text{дu}\phi\text{yзop}\alpha} := \frac{0.3164}{Re4^{0.25}}$$

$$n2 := \frac{r3^2}{r4^2} = 0.25$$

$$\gamma2 := \text{atan}\left(\frac{r3 - r4}{L_{\text{дu}\phi\text{yзop}\alpha}}\right)$$

$$\xi12 := \frac{\lambda_{\text{KOH}\phi}}{8 \cdot \sin(\gamma1)} \cdot \left(1 - \frac{1}{n1^2}\right)$$

$$p2 := p0 + \frac{\rho \cdot Vser1^2}{2} \cdot \left(1 - \frac{S1^2}{S2^2} \cdot (1 + \xi12)\right)$$

$$hl45 := \frac{\lambda t4}{4 \cdot Rr4} \cdot \frac{Vser4^2}{2 \cdot g} \cdot L_{\text{дu}\phi\text{yзop}\alpha}$$

$$hl23 := \frac{\lambda t3}{4 \cdot Rr3} \cdot \frac{Vser3^2}{2 \cdot g} \cdot l3 = 0.003$$

$$\xi34 := \frac{\lambda_{\text{дu}\phi\text{yзop}\alpha}}{8 \cdot \sin(\gamma2)} \cdot \left(\frac{n2^2 - 1}{n2^2}\right) + \left(\frac{n2 - 1}{n2}\right)^2 \cdot \sin(\gamma2 \cdot 2)$$

$$p3 := p2 - hl23 = 9.997650605 \cdot 10^5$$

$$p4 := p3 + \frac{\rho \cdot Vser3^2}{2} \cdot \left(1 - \frac{S3^2}{S4^2} \cdot (1 + \xi34)\right)$$

$$p5 := p4 - hl45$$

$$\Delta P := p5 - p1 =$$

$$\begin{bmatrix}
120.499 \\
129.166 \\
136.611 \\
143.237 \\
149.286 \\
154.911 \\
160.215 \\
165.266 \\
170.116 \\
174.8 \\
179.346 \\
183.772 \\
188.096 \\
192.33 \\
196.481
\end{bmatrix}$$

$$p0 := 1000000 \quad g := 9.8 \quad v := 1.006 \cdot 10^{-6} \quad \rho := 1000$$

$$Q := \frac{5}{3600}$$

$$r1 := 0.02$$

$$r2 := 0.01$$

$$r4 := r1$$

$$r3 := r2$$

$$l1 := 0.058$$

$$L_{\text{конфузора}} := 0.054$$

$$l3 := 0.0935$$

$$l5 := l1$$

$$\varphi := \begin{bmatrix} 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \\ 10 \\ 11 \\ 12 \\ 13 \\ 14 \\ 15 \\ 16 \\ 17 \\ 18 \\ 19 \\ 20 \end{bmatrix}$$

$$\varphi_{\text{rad}} := \frac{\varphi \cdot \pi}{180 \cdot 2} =$$

$$\begin{bmatrix} 0.052 \\ 0.061 \\ 0.07 \\ 0.079 \\ 0.087 \\ 0.096 \\ 0.105 \\ 0.113 \\ 0.122 \\ 0.131 \\ 0.14 \\ 0.148 \\ 0.157 \\ 0.166 \\ 0.175 \end{bmatrix}$$

$$L_{\text{дуфюзора}} := \frac{r4 - r3}{tg \varphi_{\text{rad}}} =$$

$$\begin{bmatrix} 0.191 \\ 0.163 \\ 0.143 \\ 0.127 \\ 0.114 \\ 0.104 \\ 0.095 \\ 0.088 \\ 0.081 \\ 0.076 \\ 0.071 \\ 0.067 \\ 0.063 \\ 0.06 \\ 0.057 \end{bmatrix}$$

$$tg \varphi_{\text{rad}} := \tan(\varphi_{\text{rad}}) =$$

$$\begin{bmatrix} 0.052 \\ 0.061 \\ 0.07 \\ 0.079 \\ 0.087 \\ 0.096 \\ 0.105 \\ 0.114 \\ 0.123 \\ 0.132 \\ 0.141 \\ 0.149 \\ \vdots \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
S1 &:= \pi \cdot r1^2 & Vser1 &:= \frac{Q}{S1} & x1 &:= r1 & Re1 &:= \frac{Vser1 \cdot x1}{v} & \lambda t1 &:= \frac{0.3164}{Re1^{0.25}} = 0.026 \\
S2 &:= \pi \cdot r2^2 & & & & & & & & \\
S3 &:= S2 & Vser2 &:= \frac{Q}{S2} & x2 &:= r2 & Re2 &:= \frac{Vser2 \cdot x2}{v} & \lambda t2 &:= \frac{0.3164}{Re2^{0.25}} = 0.022 \\
S4 &:= S1 & & & & & & & & \\
& & Vser3 &:= Vser2 & x3 &:= x2 & Re3 &:= \frac{Vser3 \cdot x3}{v} & \lambda t3 &:= \frac{0.3164}{Re3^{0.25}} = 0.022 \\
& & & & & & & & & \\
Rr1 &:= r1 & Vser4 &:= Vser1 & x4 &:= x1 & Re4 &:= \frac{Vser4 \cdot x4}{v} & \lambda t4 &:= \frac{0.3164}{Re4^{0.25}} = 0.026
\end{aligned}$$

$$Rr2 := r2$$

$$Rr3 := Rr2$$

$$Rr4 := Rr1$$

$$\lambda_{\kappa\omicron\eta\phi} := \frac{0.3164}{Re2^{0.25}}$$

$$n1 := \frac{r2^2}{r1^2} = 0.25$$

$$\gamma1 := \text{atan}\left(\frac{r1 - r2}{L_{\kappa\omicron\eta\phi\upsilon\omicron\rho a}}\right)$$

$$hl01 := \frac{\lambda t1}{4 \cdot Rr1} \cdot \frac{Vser1^2}{2 \cdot g} \cdot l1 = 0.001$$

$$p1 := p0 - hl01$$

$$\lambda_{\delta\upsilon\phi\upsilon\omicron\rho a} := \frac{0.3164}{Re4^{0.25}}$$

$$n2 := \frac{r3^2}{r4^2} = 0.25$$

$$\gamma2 := \text{atan}\left(\frac{r3 - r4}{L_{\delta\upsilon\phi\upsilon\omicron\rho a}}\right)$$

$$\xi12 := \frac{\lambda_{\kappa\omicron\eta\phi}}{8 \cdot \sin(\gamma1)} \cdot \left(1 - \frac{1}{n1^2}\right)$$

$$p2 := p0 + \frac{\rho \cdot Vser1^2}{2} \cdot \left(1 - \frac{S1^2}{S2^2} \cdot (1 + \xi12)\right)$$

$$hl45 := \frac{\lambda t4}{4 \cdot Rr4} \cdot \frac{Vser4^2}{2 \cdot g} \cdot L_{\delta\upsilon\phi\upsilon\omicron\rho a}$$

$$hl23 := \frac{\lambda t3}{4 \cdot Rr3} \cdot \frac{Vser3^2}{2 \cdot g} \cdot l3 = 0.051$$

$$\xi34 := \frac{\lambda_{\delta\upsilon\phi\upsilon\omicron\rho a}}{8 \cdot \sin(\gamma2)} \cdot \left(\frac{n2^2 - 1}{n2^2}\right) + \left(\frac{n2 - 1}{n2}\right)^2 \cdot \sin(\gamma2 \cdot 2)$$

$$p3 := p2 - hl23 = 9.9303725695 \cdot 10^5$$

$$p4 := p3 + \frac{\rho \cdot Vser3^2}{2} \cdot \left(1 - \frac{S3^2}{S4^2} \cdot (1 + \xi34)\right)$$

$$p5 := p4 - hl45$$

$$\Delta P := p5 - p1 =$$

$$\begin{bmatrix}
2.205 \cdot 10^3 \\
2.381 \cdot 10^3 \\
2.537 \cdot 10^3 \\
2.68 \cdot 10^3 \\
2.812 \cdot 10^3 \\
2.937 \cdot 10^3 \\
3.057 \cdot 10^3 \\
3.173 \cdot 10^3 \\
3.285 \cdot 10^3 \\
3.394 \cdot 10^3 \\
3.5 \cdot 10^3 \\
3.605 \cdot 10^3 \\
3.707 \cdot 10^3 \\
3.808 \cdot 10^3 \\
3.908 \cdot 10^3
\end{bmatrix}$$

$$p0 := 1000000 \quad g := 9.8 \quad v := 1.006 \cdot 10^{-6} \quad \rho := 1000$$

$$Q := \frac{5}{3600}$$

$$r1 := 0.02$$

$$r2 := 0.01$$

$$r4 := r1$$

$$r3 := r2$$

$$l1 := 0.058$$

$$L_{\text{конфузора}} := 0.054$$

$$l3 := 0.0935$$

$$l5 := l1$$

$$\varphi := \begin{bmatrix} 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \\ 10 \\ 11 \\ 12 \\ 13 \\ 14 \\ 15 \\ 16 \\ 17 \\ 18 \\ 19 \\ 20 \end{bmatrix}$$

$$\varphi_{\text{rad}} := \frac{\varphi \cdot \pi}{180 \cdot 2} =$$

$$\begin{bmatrix} 0.052 \\ 0.061 \\ 0.07 \\ 0.079 \\ 0.087 \\ 0.096 \\ 0.105 \\ 0.113 \\ 0.122 \\ 0.131 \\ 0.14 \\ 0.148 \\ 0.157 \\ 0.166 \\ 0.175 \end{bmatrix}$$

$$L_{\text{дуфузора}} := \frac{r4 - r3}{tg \varphi_{\text{rad}}} =$$

$$\begin{bmatrix} 0.191 \\ 0.163 \\ 0.143 \\ 0.127 \\ 0.114 \\ 0.104 \\ 0.095 \\ 0.088 \\ 0.081 \\ 0.076 \\ 0.071 \\ 0.067 \\ 0.063 \\ 0.06 \\ 0.057 \end{bmatrix}$$

$$tg \varphi_{\text{rad}} := \tan(\varphi_{\text{rad}}) =$$

$$\begin{bmatrix} 0.052 \\ 0.061 \\ 0.07 \\ 0.079 \\ 0.087 \\ 0.096 \\ 0.105 \\ 0.114 \\ 0.123 \\ 0.132 \\ 0.141 \\ 0.149 \\ \vdots \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
S1 &:= \pi \cdot r1^2 & Vser1 &:= \frac{Q}{S1} & x1 &:= r1 & Re1 &:= \frac{Vser1 \cdot x1}{v} & \lambda t1 &:= \frac{0.3164}{Re1^{0.25}} = 0.022 \\
S2 &:= \pi \cdot r2^2 & & & & & & & & \\
S3 &:= S2 & Vser2 &:= \frac{Q}{S2} & x2 &:= r2 & Re2 &:= \frac{Vser2 \cdot x2}{v} & \lambda t2 &:= \frac{0.3164}{Re2^{0.25}} = 0.018 \\
S4 &:= S1 & & & & & & & & \\
& & Vser3 &:= Vser2 & x3 &:= x2 & Re3 &:= \frac{Vser3 \cdot x3}{v} & \lambda t3 &:= \frac{0.3164}{Re3^{0.25}} = 0.018 \\
& & & & & & & & & \\
Rr1 &:= r1 & Vser4 &:= Vser1 & x4 &:= x1 & Re4 &:= \frac{Vser4 \cdot x4}{v} & \lambda t4 &:= \frac{0.3164}{Re4^{0.25}} = 0.022
\end{aligned}$$

$$Rr2 := r2$$

$$Rr3 := Rr2$$

$$Rr4 := Rr1$$

$$\lambda_{\text{KOH}\phi} := \frac{0.3164}{Re2^{0.25}}$$

$$n1 := \frac{r2^2}{r1^2} = 0.25$$

$$\gamma1 := \text{atan}\left(\frac{r1 - r2}{L_{\text{KOH}\phi\text{узора}}}\right)$$

$$hl01 := \frac{\lambda t1}{4 \cdot Rr1} \cdot \frac{Vser1^2}{2 \cdot g} \cdot l1 = 0.004$$

$$p1 := p0 - hl01$$

$$\lambda_{\text{дифузора}} := \frac{0.3164}{Re4^{0.25}}$$

$$n2 := \frac{r3^2}{r4^2} = 0.25$$

$$\gamma2 := \text{atan}\left(\frac{r3 - r4}{L_{\text{дифузора}}}\right)$$

$$\xi_{12} := \frac{\lambda_{\text{KOH}\phi}}{8 \cdot \sin(\gamma1)} \cdot \left(1 - \frac{1}{n1^2}\right)$$

$$p2 := p0 + \frac{\rho \cdot Vser1^2}{2} \cdot \left(1 - \frac{S1^2}{S2^2} \cdot (1 + \xi_{12})\right)$$

$$hl45 := \frac{\lambda t4}{4 \cdot Rr4} \cdot \frac{Vser4^2}{2 \cdot g} \cdot L_{\text{дифузора}}$$

$$hl23 := \frac{\lambda t3}{4 \cdot Rr3} \cdot \frac{Vser3^2}{2 \cdot g} \cdot l3 = 0.171$$

$$\xi_{34} := \frac{\lambda_{\text{дифузора}}}{8 \cdot \sin(\gamma2)} \cdot \left(\frac{n2^2 - 1}{n2^2}\right) + \left(\frac{n2 - 1}{n2}\right)^2 \cdot \sin(\gamma2 \cdot 2)$$

$$p3 := p2 - hl23 = 9.7074957367 \cdot 10^5$$

$$p4 := p3 + \frac{\rho \cdot Vser3^2}{2} \cdot \left(1 - \frac{S3^2}{S4^2} \cdot (1 + \xi_{34})\right)$$

$$p5 := p4 - hl45$$

$$\Delta P := p5 - p1 = \begin{bmatrix} 7.782 \cdot 10^3 \\ 8.436 \cdot 10^3 \\ 9.022 \cdot 10^3 \\ 9.56 \cdot 10^3 \\ 1.007 \cdot 10^4 \\ 1.055 \cdot 10^4 \\ 1.101 \cdot 10^4 \\ 1.146 \cdot 10^4 \\ 1.189 \cdot 10^4 \\ 1.232 \cdot 10^4 \\ 1.274 \cdot 10^4 \\ 1.315 \cdot 10^4 \\ 1.355 \cdot 10^4 \\ 1.395 \cdot 10^4 \\ 1.434 \cdot 10^4 \end{bmatrix}$$